

Thèses

JEAN Aurélie, Mines Paris

Directeurs de thèse : S. Forest, D. Jeulin

Date soutenance : 19 février 2009

Titre : Etude d'un élastomère chargé : de la nanostructure au macro-comportement

Résumé : En mécanique des matériaux, la volonté actuelle est de chercher à mieux comprendre certains phénomènes macroscopiques en étudiant la microstructure et les phénomènes physiques à l'échelle microscopique. Cette approche est rendue possible par les nombreux développements dans les techniques d'homogénéisation en mécanique multi-échelles. Dans la présente thèse, on travaille sur les élastomères chargés pour lesquels de nombreuses propriétés mécaniques sont étroitement liées à l'arrangement des particules et agrégats de noir de carbone dans la matrice élastomère, à l'échelle microscopique. La démarche adoptée s'articule autour de deux objectifs principaux. Le premier consiste à modéliser la morphologie de la microstructure du matériau. Pour cela, on met en place un modèle aléatoire de morphologie mathématique décrivant chaque échelle de la microstructure. On propose une méthode d'identification de ce modèle à partir de l'exploitation d'images de microscopie à transmission. Cette méthode trouve son originalité dans le fait d'optimiser le modèle en simulant des images de microscopie à transmission, sur lesquelles on mesure les moments statistiques d'ordre deux et trois que l'on compare aux moments expérimentaux. Cette méthode permet finalement de simuler des microstructures dont la morphologie est très proche de celle du matériau réel. Le second objectif consiste, à partir des microstructures ainsi simulées, à déterminer les propriétés effectives du matériau par le calcul par éléments finis à travers la notion de Volume Élémentaire Représentatif (VER). L'idée est de déterminer la taille du VER par une méthode numérique et statistique en cherchant à estimer les propriétés effectives par une approche de type Monte-Carlo, pour des simulations de microstructures de tailles croissantes. La détermination du VER porte sur les modules élastiques et la conductivité électrique. De nombreux outils tels que le maillage par éléments finis ou encore le calcul parallèle appliqué aux matériaux présentant un fort contraste sur les propriétés entre les phases, ont été explorés afin de mener à bien ce dernier objectif.

WISNIEWSKI Jean, Université Bretagne-Sud / CEA

Directeurs de thèse : D. Ayrault, J.-M. Drezet, D. Carron, P. Pilvin

Date soutenance : 13 mars 2009

Titre : Modélisation thermomécanique de la fissuration à chaud en soudage par FE d'un alliage CuCrZr

Résumé : Lors du soudage par faisceau d'électrons de certains composants techniques en alliage CuCrZr pour le réacteur de fusion Tore Supra sont apparus des problèmes importants de fissuration à chaud. Dans le cadre de cette problématique, et pour le futur réacteur ITER dont il faut assurer l'intégrité des soudures, cette étude se propose d'identifier un critère d'amorçage de défauts de fissuration à chaud. De nombreux critères de sensibilité à la fissuration à chaud sont présents dans la littérature. Quel critère mettre en oeuvre dans le cas du soudage par faisceau d'électrons de composants en alliage CuCrZr ? L'objectif de cette étude est d'apporter des éléments de réponse à cette question. Pour cela le critère phénoménologique Rappaz-Drezet-Gremaud (RDG), basé sur l'analyse de la chute de pression interdendritique et un critère thermomécanique, fondé sur le signe et l'intensité de la composante viscoplastique de la déformation en zone pâteuse, sont appliqués pour des expériences réalisées sur des géométries simples :

- i) des essais initialement développés au « Joining and Welding Research Institute » d'Osaka (JWRI). Ces essais consistent à réaliser une ligne de fusion sur une plaque rectangulaire d'alliage de CuCrZr de faible épaisseur encastrée suivant une de ses extrémités. La variation de la largeur des éprouvettes conduit à des configurations fissurantes ou non. Ces essais sont exploités pour identifier les paramètres associés pour cet alliage aux critères de fissuration à chaud.

- ii) un essai trapézoïdal. La configuration expérimentale de cette expérience est similaire à celle des essais JWRI. Cet essai permet d'observer l'initiation et l'arrêt des défauts de fissuration à chaud pour une largeur critique d'éprouvette. Cet essai est utilisé pour valider les critères identifiés.

L'identification des critères est réalisée à l'aide d'une approche couplée calculs/expériences. La réalisation des simulations thermomécaniques (principalement avec le code Cast3M développé au CEA) a nécessité des caractérisations fines des propriétés thermophysiques de l'alliage CuCrZr à l'aide de différentes techniques expérimentales. Ainsi, la méthode de SPTA (Single Pan Thermal Analysis) a été utilisée pour déterminer le chemin de solidification de l'alliage, une expérience de coulée 1D ayant permis de caractériser la conductivité thermique en fonction de la température. Enfin, des essais thermomécaniques sur machine Gleeble ont été réalisés entre la température ambiante et une température maximale de 1000 °C (0,94 TM). Ces données sont utilisées pour caractériser la dilatation thermique de cet alliage et pour identifier, par méthode inverse, les paramètres d'une loi de comportement élastoviscoplastique à écrouissage isotrope. La comparaison entre des essais JWRI avec géométries fissurante et non fissurante a permis d'identifier les critères retenus. L'étude propose également une réflexion sur la validation des critères à l'aide de l'essai trapézoïdal. Des recommandations importantes pour la simulation numérique des procédés de soudage pour ce type d'alliages sont mises en avant. En effet, nous avons constaté l'importance du choix de la taille de maille pour la mise en oeuvre des critères de fissuration dans les calculs par éléments finis.

LE MAOUT Nicolas, Université Bretagne Sud

Directeurs de thèse : P.Y. Manach, S. Thuillier

Date soutenance : 17 mars 2009

Titre : Analyse des procédés de sertissage de tôles métalliques. Aspects expérimentaux et numériques, endommagement des pièces serties

Résumé : Cette étude, réalisée dans le cadre d'une thèse en contrat CIFRE avec la société PSA, a pour objectif l'étude expérimentale et numérique du procédé de sertissage des tôles métalliques. Ce procédé intervient dans les dernières opérations de mise en forme des ouvrants automobiles, après l'emboutissage et le tombage de bord (inclinaison du bord de la pièce à 90°). Il s'agit d'un procédé d'assemblage par déformation plastique à froid, entre la peau extérieure et la doublure (partie renforçante) d'un ouvrant. Il est classiquement scindé en deux étapes, qui sont le présertissage, qui amène le bord tombé à environ 45° de la doublure, et le sertissage. Deux matériaux sont étudiés : un aluminium de la série 6000 et un acier à bake hardening. La caractérisation est réalisée à l'aide d'essais de traction uniaxiale et de cisaillement monotone et alterné, afin de caractériser l'effet Bauschinger. L'étude s'est particulièrement attachée à la détermination des paramètres matériaux d'une loi de comportement élastoviscoplastique avec des critères de plasticité isotrope et anisotrope couplés à un écrouissage isotrope et mixte. Un dispositif de sertissage spécifique a été conçu pour permettre le tombage et le sertissage classique et par roulage d'éprouvettes de laboratoire non planes (galbe) avec des bords courbes. Ces éprouvettes ont subi des prédéformations par expansion biaxiale (2 rayon de galbe différents) puis sont découpées par laser, tombées et serties sur le dispositif. Ces essais ont constitué une base de données expérimentale pour plusieurs géométries, avec mesure des caractéristiques géométriques et des efforts. La modélisation du procédé de sertissage classique a été réalisée avec le logiciel Pamstamp2G R° afin de déterminer l'influence des lois de comportement (critère de plasticité et type d'écrouissage) sur les résultats de la prédiction numérique. L'étude s'est également orientée sur le développement d'un outil numérique permettant la modélisation du sertissage par roulage, afin de décrire la trajectoire du galet. La base d'essais a permis la calibration du procédé en déterminant les paramètres numériques optimaux à adopter pour cette mise en donnée particulière. La déformation plastique équivalente atteint localement des valeurs entre 0.8 et 1.0 dans la zone pliée et des fissures peuvent apparaître pour l'alliage d'aluminium. Une loi de comportement qui prend en compte l'endommagement ductile (modèle GTN) a été identifiée à l'aide d'essais de traction uni-axiale sur éprouvettes droites et avec entailles ainsi que sur des es-

sais d'expansion biaxiale. Des essais expérimentaux représentatifs du procédé de sertissage ont permis de quantifier expérimentalement cet endommagement sur la zone pliée et leur modélisation numérique, la détermination de la limite de sertissabilité de la structure.

VIVIER Florent, Mines ParisTech

Directrice de thèse : A.F. Gourgues-Lorenzon

Date soutenance : 23 mars 2009

Titre : Fluage à 500°C d'un joint soudé d'un acier 9Cr-1Mo modifié - évolution de la microstructure et comportement mécanique

Résumé : Avec la demande croissante en énergie, la filière du nucléaire de fission se positionne comme une réponse fiable à ce besoin mondial. Dans le cadre de la mise au point des nouveaux réacteurs dits de la Génération IV et parmi les six systèmes de réacteurs retenus, la France s'attache notamment à la conception du Very High Temperature Reactor, qui prévoit l'utilisation de matériaux devant résister à plus hautes températures et plus longtemps. Parmi les matériaux existants, AREVA a fait le choix d'étudier le comportement mécanique du Grade 91 (Fe-9Cr-1Mo-NbV) pour équiper les gros composants. Ces gros composants sont des structures soudées, si bien que les soudures, points faibles potentiels, doivent être étudiées. Les trois partenaires industriels (AREVA, CEA, EDF) ont lancé une étude commune en octobre 2005 avec le Centre des Matériaux de l'Ecole des Mines de Paris sur le fluage d'un joint soudé de Grade 91. L'objectif de cette étude est de compléter les données existantes sur le comportement du Grade 91, métal de base et joint soudé, sous une sollicitation de fluage à 500°C pour des durées d'exposition allant jusqu'à 4500 h. Des essais de vieillissement thermique, de traction et de fluage à 450°C et 500°C, sur du métal de base et du joint soudé ont été réalisés. Différentes géométries d'éprouvettes de fluage de joint soudé ont été testées. Aucune évolution significative de la microstructure n'a été constatée en termes de nature et de taille de précipités et de dimension de la sous-structure par rapport à la microstructure avant essai. Peu d'endommagement par cavitation a pu être mis en évidence. Le mécanisme qui conduit à la ruine finale du matériau après fluage est de type viscoplastique à 500°C, contrairement à 625°C où l'endommagement par cavitation est la cause principale de la rupture des éprouvettes de fluage pour les temps d'exposition les plus longs. A partir des courbes expérimentales de fluage du métal de base et du joint soudé entier, un modèle phénoménologique de comportement de type Norton à 500°C est proposé. L'exposant de Norton du métal de base est de 19, alors que celui du joint soudé entier est de 18. Ces valeurs suggèrent la présence de contraintes internes et indiquent que le glissement des dislocations peut être le mécanisme qui contrôle la déformation par fluage. Les éprouvettes de joint soudé cassent dans le métal fondu en fluage et dans le métal de base en traction. La zone affectée thermiquement n'a pas de rôle visible dans la résistance de la structure à 500°C, du moins jusqu'à 4500 h. De ce fait, une décomposition en série du comportement en fluage du joint soudé entier peut être faite à l'aide de ceux du métal fondu et du métal de base. Connaissant le comportement du métal de base et du joint soudé entier, il est possible d'ajuster les paramètres du modèle au métal fondu. Une autre méthode d'ajustement des paramètres du métal fondu est également proposée à partir des essais sur une géométrie amincie contenant uniquement du métal fondu. Les résultats de ces modèles sont cohérents avec les données de la littérature. Ce modèle permet de prédire le temps à rupture à plus long terme, en bon accord avec des résultats du CEA, avec des outils simples de modélisation.

BUSSER Vincent, INSA Lyon

Directeurs de thèse : M.C. Baietto-Dubourg, J. Desquines

Date soutenance : 27 mars 2009

Titre : Mécanismes d'endommagement de la couche d'oxyde des gaines de crayons de combustible en situation accidentelle de type RIA

Résumé : En cas d'accident de réactivité, le comportement thermomécanique des gaines de crayons de combustible est fortement influencé par la présence de la couche d'oxyde formée sur les gaines en alliage de zirconium durant son irradiation en réacteur. L'initiation de fissures radiales dans la

zircon, suivie de la desquamation de fragments ont un impact important sur la tenue mécanique de la gaine. L'objectif de cette thèse est d'étudier les mécanismes susceptibles de conduire à la desquamation de la couche d'oxyde sous l'effet de sollicitations mécaniques. Des tronçons de gaines en Zircaloy-4 ont été oxydés artificiellement en air à 470°C. Des observations métallographiques de tronçons de gaine ayant subi l'oxydation artificielle ont révélé la présence de nombreuses fissures au sein de la zircon. Un code de modélisation mécanique de la croissance de la couche d'oxyde a été développé. Il permet la prédiction des profils de contraintes dans l'oxyde et la profondeur des fissures radiales initiées dans l'oxyde. Le modèle a été validé sur des essais de la littérature et sur les essais réalisés au cours de cette étude. La fissuration-desquamation de la couche d'oxyde a été étudiée à partir d'examen métallographiques d'anneaux ayant subi un essai de compression d'anneau. L'analyse des données expérimentales a révélé une succession de plusieurs mécanismes : initiation de fissures radiales dans la couche d'oxyde, puis propagation radiale de ces fissures jusqu'à l'interface métal-oxyde et, enfin, bifurcation et propagation de la fissure le long de l'interface conduisant à la desquamation de fragments. Ces mécanismes ont été identifiés et caractérisés sur la couche d'oxyde formée dans les conditions de laboratoire de l'étude. Une étude numérique a été initiée afin de simuler le comportement des gaines oxydées sous sollicitation mécanique. Le rôle-clé joué par les porosités circonférentielles sur la tenue mécanique des fragments d'oxyde a été démontré. Les résultats, bien que qualitatifs, sont plutôt cohérents avec une zircon de porosité circonférentielle importante, conformément aux examens métallographiques, et de faible contrainte à rupture.

TSITSIRIS Elli, ENS Cachan

Directeurs de thèse : H. Zhao et S. Patoffatto

Date de soutenance : 30 mars 2009

Titre : Techniques expérimentales avancées aux barres de Hopkinson et imagerie rapide

Résumé : Cette thèse, qui concerne la technique de sollicitation dynamique des barres de Hopkinson, porte sur l'étude de deux applications non conventionnelles pour lesquelles il s'avère nécessaire de compléter la technique classique par des techniques d'imagerie rapide et de mesure de champs cinématiques par corrélation d'images numériques. La première application concerne l'effet d'épaisseur observé par Dioh *et al.*. Celui-ci se traduit par une dépendance de la réponse macroscopique mesurée à l'épaisseur de l'échantillon lors d'un essai de compression aux barres de Hopkinson sur un polymère thermoplastique. Différentes pistes sont explorées pour expliquer le phénomène, que l'on peut séparer en causes intrinsèquement liées à l'essai (frottement, inertie, homogénéité) et en causes liées au comportement du matériau (échauffement, changement de phase, pression). Une campagne d'essais de compression statique et dynamique a été mise en œuvre pour reproduire et quantifier l'effet d'épaisseur, et une analyse critique de la technique expérimentale permet de s'assurer que le phénomène n'est pas imputable à certains artefacts expérimentaux. Enfin, l'imagerie et la mesure de champs cinématiques par corrélation d'images numériques ont été mises en œuvre pour compléter la technique classique. Des effets de localisation de déformation sont ainsi mis en évidence, qui permettent de faire le distinguo entre effets tridimensionnels et effets liés à la propagation des ondes. La seconde application est une étude d'un composite sandwich à base thermoplastique. Des essais préalables de caractérisation statique et dynamique du comportement du matériau sandwich et de ses constituants ont orienté l'étude vers une caractérisation plus fine du comportement dynamique orthotrope du constituant « peau ». Cette caractérisation est effectuée par des essais de perforation, qui présentent l'intérêt d'être facilement transposables de la statique à la dynamique. Toutefois, la réponse globale que fournit un tel essai ne permet pas de distinguer les différentes contributions des axes d'orthotropie du matériau. L'imagerie rapide et la mesure de champs cinématiques par corrélation d'images numériques permettent de pallier ce manque en apportant une mesure des champs de déplacement dans le plan d'un échantillon soumis à un essai de perforation. Une méthodologie d'identification inverse, qui couple les résultats expérimentaux et des résultats de simulation numérique, est enfin proposée.

QUEY Romain, Mines Saint-Etienne

Directeurs de thèse : J. Driver, D. Piot

Date soutenance : 17 avril 2009

Titre : Suivi de microtextures dans l'aluminium en grande déformation à chaud

Résumé : Les simulations de textures cristallographiques de déformation reposent communément sur des modèles simplifiés (Taylor, autocohérent, etc.). Ces modèles, prenant en compte l'interaction intergranulaire selon différentes hypothèses, fournissent généralement des intensités de composantes de textures incorrectes, tendant à être surévaluées. Pour le développement et l'évaluation des modèles, une approche fine et instructive bien que très peu adoptée à ce jour, car très délicate de mise en oeuvre, consiste à étudier les rotations cristallines des grains individuels. Les études proposées dans la littérature sont globalement peu satisfaisantes, et conduisent même à des conclusions divergentes. L'approche développée dans cette thèse, le "suivi de microtextures", s'appuie sur l'utilisation conjointe d'un "échantillon tranché" déformé en compression plane à chaud en plusieurs passes, et de la technique EBSD, permettant une analyse systématique des grains sur la surface médiane de l'échantillon, au coeur du polycristal. 176 grains ont ainsi pu être suivis aux déformations successives de 0, 0.2, 0.4, 0.8 et 1.2. Les rotations cristallines des grains sont étudiées en grand détail. Seuls 10 % des grains, d'orientations de haute symétrie, se fragmentent. Les rotations moyennes des autres grains sont décrites en terme d'angle, d'axe et de tortuosité. Les dispersions intragranulaires sont rattachées aux mécanismes d'accommodation des déformations. Pour la première fois, une caractérisation rigoureuse de l'effet de l'interaction intergranulaire sur les rotations moyennes des grains est proposée. Nous montrons que deux grains de même orientation, mais de voisinages différents, ont en moyenne des angles / axes de rotation différant de 25 % / 37 degrés, et des orientations finales différant de 12 degrés. Une large gamme de modèles sont étudiés au regard de ces propriétés : le modèle de Taylor, un modèle autocohérent (VPSC), un modèle de type Taylor développé par ailleurs (RSI) et un modèle éléments finis. Le modèle de Taylor fournit un accord au premier ordre pour l'axe de rotation (correct à 39 degrés près en moyenne) comme pour la composante finale (correcte pour 59 % des grains). Le modèle autocohérent, ainsi que les modèles RSI et éléments finis appliqués à la morphologie granulaire observée (2D), ne fournissent pas de meilleur accord. Par nature, les modèles de Taylor et autocohérent ne peuvent rendre compte de l'effet de l'interaction intergranulaire mis en évidence. Celui-ci a pu être déterminé pour le modèle RSI, et apparaît être sous-évalué (8 degrés pour l'axe). Les perspectives de cette étude comprennent le développement de nouveaux modèles, mais aussi l'étude d'autres phénomènes thermomécaniques (recristallisation, etc.).

LE Hoai Nam, ENSMA Poitiers

Directrice de thèse : C. Gardin

Date soutenance : 12 mai 2009

Titre : Etude de propagation d'une fissure sous chargement thermique cyclique induisant un gradient de température dans l'épaisseur

Résumé : Cette étude vise à appréhender le phénomène de propagation de fissure par fatigue thermique induisant un gradient de température dans l'épaisseur. Dans un premier temps, un dispositif expérimental original a été mis au point, permettant de soumettre une éprouvette parallélépipédique de 304L à du cyclage thermique entre 350°C et 100°C, en l'absence de chargement mécanique. Deux entailles semi-circulaires (profondeur 0,1mm, de largeur 4mm) ont été usinées. Les essais interrompus réalisés ont permis de caractériser et quantifier la propagation de la fissure existante en surface et à coeur. Dans une deuxième partie, des calculs numériques tridimensionnels ont été effectués sous Abaqus. Une automatisation utilisant Python a permis de simuler la propagation d'une fissure sous cyclage thermique, avec remaillage en front de fissure à chaque pas de calcul. Aucune hypothèse n'a été prise sur la forme de fissure durant la propagation. Une comparaison avec les résultats d'essais montre une très bonne concordance sur l'évolution de la forme du front de fissure ainsi que sur les cinétiques de propagation au bord et à coeur. Une approche analytique a également été développée se basant sur le calcul du facteur d'intensité de

contraintes (FIC). Une approche bidimensionnelle a d'abord été mise en place nous permettant de mieux comprendre l'influence de différents paramètres thermiques et géométriques. Enfin, une approche tridimensionnelle, avec une fissure demeurant elliptique pendant la propagation, a abouti à une prédiction de la propagation en largeur et profondeur de la fissure tout à fait comparable à celle obtenue numériquement, mais avec des temps de calcul bien moindres.

PARENTEAU Thomas, Université Bretagne Sud

Directeurs de thèse : G. Ausias, Y. Grohens, P. Pilvin

Date soutenance : 12 mai 2009

Titre : Modélisation micromécanique de composites thermoplastiques élastomères à matrice polypropylène

Résumé : De part leur grande consommation et leur nature, les pièces en élastomère vulcanisé sont une source importante de déchets. Une des voies de revalorisation de ces matériaux est leur réutilisation sous forme de particules dans des composites à matrice polymère, afin de diminuer leur rigidité et d'augmenter leur résistance aux chocs de faible énergie. Cette étude est ainsi née d'une collaboration entre le LIMatB et l'Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik (IMK) de la Technische Universität Chemnitz (TUC), qui développe ce concept de matériaux mis en forme par des procédés d'injection classique. L'objectif de cette étude est la caractérisation expérimentale et la modélisation du comportement mécanique de composites thermoplastiques élastomères (TPEs) ainsi que de ses constituants avant striction et à température ambiante. On peut ainsi espérer qu'une connaissance a priori des propriétés d'usage de ces composites permettrait d'optimiser la conception de pièces en TPE. Les TPEs sont composés d'une matrice en homopolymère polypropylène isotactique (PP) et de particules d'élastomère recyclées à base d'éthylène propylène diène monomère (EPDM). La nature complexe du PP, mise en évidence à travers différents moyens de caractérisation physico-chimique et mécanique, nous a incité à développer un modèle micromécanique, en distinguant dans ce polymère semi-cristallin, une phase amorphe et une phase cristalline. A partir d'un motif représentatif permettant d'estimer les propriétés élastiques du PP en fonction de son taux de cristallinité, un modèle micromécanique de type autocohérent généralisé est ensuite comparé à un modèle macroscopique plus simple pour décrire son comportement élastoviscoplastique. L'influence de la pression hydrostatique sur le comportement du PP est également étudiée par l'intermédiaire d'essais d'indentation instrumentés réalisés au LARMAUR (Université de Rennes 1). Cette spécificité a été prise en compte dans la loi d'écoulement viscoplastique de la phase cristalline, en simulant par approche inverse les essais d'indentation. Enfin, le modèle micromécanique du PP a été validé par la simulation d'essais de flexion quatre points. Dans le cas des TPEs, un modèle micromécanique a également été retenu afin d'optimiser les propriétés d'usage de ces matériaux en développement. La loi de comportement des TPEs est ainsi construite, via une démarche d'homogénéisation, à partir du comportement mécanique des particules d'EPDM et à l'aide de la loi macroscopique déterminée pour le PP. Identifié sur des essais de traction uniaxiale pour deux fractions volumiques de particules d'EPDM (40%w et 60%w), les prévisions du modèle micromécanique des TPEs sont ensuite analysées et comparées aux résultats d'essais de flexion et d'essais de traction sur d'autres formulations des composites. Les modèles développés ont été implantés dans le code « éléments finis » Abaqus afin de permettre le calcul de pièces industrielles et l'analyse des essais de flexion et d'indentation. A l'échelle des phases, ces analyses par « éléments finis » ont permis également de recalibrer la règle de transition d'échelle retenue pour décrire l'accommodation non linéaire des champs mécaniques entre les phases des modèles micromécaniques du PP et des TPEs.

AOUAFI Anis, Université Paris XIII

Directrices de thèse : M. Gasperini, S. Bouvier

Date soutenance : 12 juin 2009

Titre : Analyse et modélisation du comportement en chargement inversé d'aciers ferritiques et micro-alliés : prise en compte de la taille de grains et des précipités dans des lois d'écrouissage

mixte

Résumé : L'objectif de la thèse est d'analyser et modéliser l'influence de la taille de grains et des précipités sur l'écrouissage en chargement inversé d'aciers ferritiques et micro-alliés (HSLA), afin d'élaborer des lois d'écrouissage mixte (isotrope et cinématique) dépendant explicitement de paramètres microstructuraux. La caractérisation expérimentale de la microstructure initiale des aciers HSLA a permis d'obtenir les paramètres morphologiques (taille de grains, fraction et taille des précipités...) utiles pour la modélisation du comportement. La caractérisation du comportement mécanique des différents matériaux a été effectuée à l'aide d'essais de cisaillement simple monotone et inversé. Une attention particulière a été accordée aux évolutions de l'effet Bauschinger en fonction de la prédéformation imposée et à l'existence de régimes transitoires d'écrouissage. Un modèle scalaire d'écrouissage mixte inspiré d'une approche de type KME est présenté. L'écrouissage cinématique est considéré comme la somme de deux termes, attribués respectivement à l'effet de joint de grains et à l'effet des précipités. Ce modèle permet de prévoir pour les aciers considérés, présentant différents paramètres morphologiques, le comportement en chargement monotone ainsi que l'évolution de l'effet Bauschinger en fonction de la prédéformation. Dans le cas du chargement inversé, la réponse du modèle est comparée à celles issues de différents modèles phénoménologiques d'écrouissage mixte. Les résultats sont encourageants et montrent que l'on peut prévoir partiellement la dépendance de l'écrouissage global en fonction de caractéristiques microstructurales moyennes.

CHANG Hyung-Jun, INPG / Seoul National University

Directeurs de thèse : M. Fivel, L. Tabourot, M. Verdier

Date soutenance : 15 juin 2009

Titre : Analysis of Nano indentation Size effect based on Dislocation Dynamics and Crystal Plasticity

Résumé : This thesis deals with experiments and simulations of nanoindentation in copper single crystals. Indentation experiments are performed with different orientations of the indentation axis and both the load-displacement curve and the surface imprint observed by atomic force microscopy are analysed and compared. Indentation size effect is observed for low penetration of the indenter. Simulations are then performed using crystal plasticity finite element modelling. ABAQUS user subroutines are specially developed in order to account for the physics of dislocation activity in the twelve glide systems of copper crystals. 3D simulations are then performed and comparisons with the experiments give access to key parameters of the constitutive equations. The indentation size effect is reproduced using a simplified size effect theory implanted in the finite element modelling. Finally, a multiscale approach based on discrete dislocation dynamics is used to reproduce (111) indentations of copper single crystals. Molecular dynamics simulations give details of dislocation nucleation beneath the indenter. Dislocation dynamics simulations are then performed and the indentation size effect is addressed.

BIDOUARD Hadrien, ENSAM Bordeaux

Directeurs de thèse : N. Saintier, T. Palin-Luc

Date soutenance : 24 juin 2009

Titre : Etude de l'effet de surcharges sur la tenue en fatigue a grande durée de vie d'un acier ferrito-bainitique sous chargement d'amplitude variable

Résumé : Les pièces de châssis automobile sont dimensionnées pour résister à l'amorçage des fissures de fatigue sous les chargements d'amplitude variable qu'elles supportent en service. Des surcharges incidentelles appartenant au domaine de la fatigue oligocyclique, peuvent toutefois arriver dans la vie d'une automobile (nid de poule, montée d'un trottoir à vive allure). L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de telles surcharges sur la résistance à l'amorçage de fissures de fatigue dans le domaine de la fatigue à grand nombre de cycles (de 10^5 à 10^7 cycles). L'objectif industriel à moyen terme est le développement d'une méthode de dimensionnement en fatigue permettant une prise en compte réaliste de ces surcharges. Face à la faible quantité de travaux

expérimentaux trouvés sur les interactions " fatigue oligocyclique/fatigue à grand nombre de cycles ", une base de données a été constituée grâce à une campagne d'essais réalisée sous différents cas de chargements réalistes d'amplitude constante et variable, avec et sans surcharges, sur des éprouvettes entaillées ($K_t=2,5$). La géométrie d'entaille définie ainsi que le matériau utilisé (acier ferritobainitique) sont représentatifs de ceux rencontrés sur les bras de suspensions automobiles permettant ainsi d'assurer une transférabilité vers les structures industrielles. Cette campagne d'essais a permis de mettre en évidence un effet néfaste des surcharges sur la résistance à l'amorçage d'une fissure pour certains cas de chargements. Une très forte sensibilité au rapport de charge utilisé a pu être mise en évidence. Les durées de vie observées correspondant majoritairement à une phase d'amorçage, celle-ci a été étudiée au travers de l'analyse du comportement cyclique du matériau, grâce à des essais à contraintes et déformations imposées sur éprouvettes lisses et entaillées. Ces essais ont permis de mettre en évidence l'apparition d'un effet de Rochet sur éprouvettes entaillées au bout d'un certain nombre de cycles conditionnant l'amorçage d'une fissure. L'effet néfaste des surcharges sur la tenue en fatigue peut s'expliquer par l'interaction surcharge/effet de Rochet : il a été montré que l'application de surcharges entraîne une diminution du nombre de cycles nécessaire au déclenchement du Rochet. Cette accélération fait suite à la propagation des bandes de Piobert-Lüders liée à l'application des surcharges augmentant localement la densité de dislocations, phénomène favorable à l'apparition du Rochet.

NOURI H., ENSAM Metz

Directeur de thèse : F. Meraghni

Date soutenance : 29 juin 2009

Titre : Modélisation et identification de lois de comportement avec endommagement en fatigue polycyclique de matériaux composites à matrice thermoplastique

Résumé : Les matériaux composites thermoplastiques constituent une solution technologique de premier ordre pour la fabrication de pièces et de composants fonctionnels ou de structure notamment pour l'industrie automobile. Le travail abordé dans le cadre de cette thèse constitue une contribution à la compréhension et à la modélisation de la cinétique d'endommagement dans les thermoplastiques renforcés par des fibres de verre courtes (PA6-GF30) et longues (PP-GFL40) sous chargement cyclique. Il a permis de développer et d'identifier un modèle d'endommagement en fatigue intégrant la cinétique de dégradation spécifique aux thermoplastiques renforcés. Deux approches complémentaires ont été développées dans de cette étude. La première est une approche expérimentale dédiée à la caractérisation de l'endommagement dans les matériaux étudiés en tenant compte de l'effet du procédé de moulage par injection sur le comportement élastique endommageable. Les résultats de l'approche expérimentale ont alimenté les bases théoriques de la deuxième approche proposant une formulation d'un modèle phénoménologique d'endommagement en fatigue. Le modèle a été implanté dans le code de calcul par éléments finis Abaqus au moyen d'une routine utilisateur UMAT. Il intègre les trois phases d'endommagement des composites thermoplastiques traduites phénoménologiquement par une cinétique d'évolution de cinq variables d'endommagement. Deux stratégies d'identification inverse ont été développées pour la détermination des paramètres du modèle d'endommagement. La première stratégie exploite la perte de modules mesurée lors des essais de fatigue en configuration homogène. La deuxième stratégie exploite les essais de fatigue en configuration hétérogène. Celle-ci a été optimisée afin de générer une évolution spatio-temporelle des déformations. Les paramètres d'endommagement sont identifiés par minimisation d'une fonction objectif construite sur la base des champs de déformations hétérogènes et des efforts sur la frontière. Les essais de fatigue réalisés à différents niveaux de déplacements imposés ont permis de valider expérimentalement le modèle d'endommagement développé. Les potentialités prédictives du modèle ont été également démontrées à travers la simulation de l'évolution de l'endommagement sous chargement cyclique à amplitudes variables ou dans le cas d'un chargement cyclique biaxial combiné ou séquentiel. Ce dernier aspect a permis de démontrer la capacité du modèle à prédire l'effet du trajet de chargement multiaxial sur l'évolution de l'endommagement en fatigue dans les thermoplastiques renforcés.

BOISOT Guillaume, Mines Paris

Directeurs de thèse : L. Laiarinandrasana, C. Fond

Date soutenance : 30 juin 2009

Titre : Mécanismes et modélisation mécanique de la déformation, de l'endommagement et de la rupture du PolyAmide 11 pur et renforcé choc

Résumé : ARKEMA s'intéresse à la conception de

matériaux thermoplastiques renforcés au choc en incorporant des particules dans le polymère pur au moment de la mise en forme et à l'effet du vieillissement hydrolytique sur ces mêmes matériaux. L'ajout d'une seconde phase de type élastomère est une technique souvent utilisée dans le but d'améliorer la résilience d'un polymère, celle-ci étant testée par essais Charpy. La présence de particules modifie les mécanismes d'endommagement par germination, croissance et coalescence de cavités soit en coeur des particules de renfort, soit à l'interface matrice-particule. La matrice des polymères renforcés de l'étude consiste en du PolyAmide 11 (PA11), un thermoplastique semi-cristallin. Ce matériau, qui possède une porosité initiale mesurée de l'ordre de 1% blanchit sous charge. Ce blanchiment est dû à une augmentation de la porosité par croissance de cavités, qui engendre une variation de volume. On s'intéresse donc aux phénomènes d'endommagement par cavitation dans les matériaux polymères, ceux-ci pouvant conduire jusqu'à la rupture finale. Dans la thèse, la compréhension des mécanismes d'endommagement est analysée aussi bien pour la matrice de PA11 neuf, pour la matrice de PA11 plastifiée et vieillie que pour deux matériaux renforcés. En effet, l'étude se focalise sur plusieurs grades de PA11 :

- PA11, le matériau de base de l'étude ;
- "aged P40", un polyamide 11 plastifié et vieilli ;
- "aged P20 EPR", un polyamide 11 plastifié et vieilli contenant une seconde phase de particules d'EPR ;
- "aged P20 XNBR", un polyamide 11 plastifié et vieilli contenant une seconde phase de particules de XNBR.

Les matériaux "Aged P40", "Aged P20 EPR" et "Aged P20 XNBR" ont donc été vieillis dans des conditions similaires pour le contexte de l'étude. Des essais sur différents types d'éprouvettes, à différentes températures et vitesses de traction ont été menés. L'observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB) de coupes au microtome d'échantillons obtenus suite à des essais interrompus permet de quantifier la porosité et d'en évaluer sa cinétique de croissance en fonction du taux de triaxialité des contraintes. La température de transition vitreuse, T_g , du PA11 est de l'ordre de 50°C. Pour des essais à température ambiante, un auto-échauffement local du polymère pourrait engendrer un franchissement de T_g et de ce fait, modifier les mécanismes de déformation et d'endommagement du matériau. Certains essais ont donc été instrumentés par une caméra thermique afin de mesurer l'élévation de la température dans les endroits critiques. Concernant les matériaux renforcés, des mesures de densité par pycnométrie ont été entreprises afin de déterminer la variation de volume avant et après essai. Cette information est une donnée clé pour obtenir, par l'intermédiaire de la rétro-diffusion cohérente, la densité et la fraction de vide des nodules endommagés. Les lois de comportement élasto-visco-plastiques classiques ne suffisent pas à rendre compte du phénomène de croissance de cavités. Cette étude poursuit les travaux antérieurs réalisés au Centre des Matériaux qui ont montré l'intérêt de modéliser par éléments finis le comportement de différents polymères thermoplastiques via une loi de comportement issue de la mécanique des milieux poreux : le modèle de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN). Les coefficients de ce modèle sont identifiés à partir des courbes globales et des informations locales telles que les taux de porosité mesurés au cours des essais interrompus par analyse d'images. Les essais suivis par caméra thermique, couplés à une identification des paramètres intervenant dans le modèle de Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) en fonction de la température, ont permis d'effectuer des calculs thermo-mécaniques à couplage faible et par conséquent de prendre en compte l'auto-échauffement du matériau. Dès lors, il est possible d'accéder aux champs de contrainte et déformation en pointe de fissure, données indispensables pour effectuer des calculs micromécaniques dans le cas des

matériaux renforcés. Le champ de contrainte ainsi obtenu est appliqué à des cellules élémentaires. Des simulations numériques à l'échelle de la micromécanique ont été effectuées pour investiguer l'influence de la taille des nodules ou de la distance interparticulaire sur la naissance et croissance d'une cavité entre deux nodules. Cette thèse montre qu'une nouvelle fois le modèle de Gurson-Tvergaard-Needleman, modèle initialement développé pour l'étude de la rupture ductile des matériaux métalliques, s'applique dans le cas d'un matériau polymère semi-cristallin. Le modèle s'avère pertinent pour décrire le comportement endommageable du matériau. Tout comme dans le PVDF, deux critères d'amorçage apparaissent : un critère en coalescence de cavités et un critère d'élongation des fibrilles. Les polymères se déformant rarement dans des conditions d'isothermie, l'auto-échauffement du matériau a été pris en compte en rendant les paramètres intervenant dans le modèle dépendant de la température ; les résultats s'avèrent intéressants et concordent bien avec ceux obtenus expérimentalement. La thèse met également en lumière la préservation de la ductilité par l'ajout d'une seconde phase de caoutchouc en dépit du vieillissement hydrolytique, dans une zone de température inférieure à la zone de température de transition vitreuse. Cependant nous montrons que, selon les caractéristiques de cette seconde phase, les mécanismes d'endommagement peuvent varier et ainsi le critère d'amorçage changer.

DLOUHA Jana, Université Montpellier II

Directeurs de thèse : J. Gril, P. Horacek

Date soutenance : 1er juillet 2009

Titre : Comportement viscoélastique longitudinal du bois vert : diversité et prédiction à long terme

Résumé : Le but de l'étude consistait à prédire le comportement viscoélastique longitudinal du bois vert dans la période correspondant à la vie d'un arbre et d'explorer la diversité de ces propriétés. Le travail s'est déroulé en deux temps. Une analyse exploratoire des propriétés vibratoires a été effectuée sur un large échantillon incluant divers types de bois, y compris des bois de réaction, issus de dix espèces tropicales. Dans un deuxième temps, une sélection restreinte des échantillons a été utilisée pour une étude approfondie du comportement en fluage à long terme. Par ailleurs, la relation avec les paramètres structuraux tels que densité, angle des microfibrilles et pourcentage des éléments anatomiques a été étudiée. Une procédure d'évaluation du fluage à long terme a été mise au point à partir d'essais à différentes températures. L'occurrence du vieillissement physique suite au refroidissement consécutif au chauffage au dessus de la température de transition vitreuse du bois a été mise en évidence. L'applicabilité du principe d'équivalence temps-température a été remise en question par l'analyse des résultats dans le plan complexe approché (PCA). L'hypothèse supplémentaire de la dépendance de la complaisance initiale à la température, similaire à l'élasticité entropique des polymères amorphes, a été proposée et appliquée, permettant de prédire avec succès le comportement à long terme à partir d'essais courts. Le fluage thermoactivé, ainsi que le phénomène de vieillissement physique, ont été décrits par un modèle de Maxwell parabolique identifié à partir de la représentation des résultats dans le PCA. Le comportement en fluage est apparu non corrélé au coefficient d'amortissement mesuré lors des essais vibratoires, suggérant une dissociation entre les mécanismes rhéologiques qui contrôlent le comportement viscoélastiques aux échelles de temps acoustiques (quelques centaines de Hertz) et biologiques (plusieurs années). Enfin, l'hypothèse d'un effet prépondérant de la lamelle mitoyenne sur le processus de fluage a été suggérée pour expliquer les faibles corrélations observées entre le fluage relatif et la structure des parois cellulaires.

WITZ Jean-François, ENS Cachan

Directeurs de thèse : S. Roux, F. Hild

Date soutenance : 1er juillet 2009

Titre : Relations entre texture et propriétés thermomécaniques de laines minérales

Résumé : Les laines minérales possèdent une texture hétérogène qui a une forte influence sur les propriétés mécaniques (produits crêpés de densité moyenne) et thermiques (produits légers). Ce mémoire porte sur la prise en compte de cette texture dans l'analyse de leurs propriétés. En ce qui

concerne les laines minérales crêpées, des essais mécaniques imposant des sollicitations globales homogènes (compression, compression/cisaillement) ont été caractérisés par corrélation d'images permettant d'accéder à des champs de déplacements spatialement résolus bi et tridimensionnels. Ces champs cinématiques auxquels sont adjoints des champs d'orientation locale, permettent d'apprécier un comportement élastique localement orthotrope par une technique numérique d'identification. En ce qui concerne les produits légers, les transferts thermiques locaux ont été observés à l'aide d'une caméra infrarouge. L'hétérogénéité des flux thermiques en régime stationnaire est très directement corrélée avec la transmission dans le spectre visible (0.56 à 0.70 μm), ce qui permet d'apprécier quasi instantanément cette caractéristique dont l'établissement en thermique est assez longue (plusieurs dizaines de minutes) et constitue un premier pas vers le contrôle en ligne des performances thermiques. Une technique d'identification tridimensionnelle exploitant la loi de Fourier sous hypothèse d'isotropie transverse et des mesures de champs de température sur toutes les faces libres a été développée et utilisée dans le cadre d'un essai plan chaud stationnaire. Pour ces deux types de matériaux et de propriétés étudiés, la modélisation proposée et son identification permettent d'apprécier a priori l'effet d'une modification de microstructure sur les propriétés macroscopiques. Cette démarche, dont un enjeu est le contrôle en ligne de production des performances mécaniques, a été validée sur quelques exemples.

ROMERO DE LA OSA Marcos, INSA Lyon

Directeurs de thèse : R. Estevez, C. Ollagnon, J. Chevalier

Date soutenance : 2 juillet 2009

Titre : Modélisation de la fissuration lente d'une céramique technique de type ferrite

Résumé : Même s'ils ont été moins étudiés, les ferrites comme la plupart des matériaux céramiques sont sensibles à la rupture différée dans le temps. Le processus de fissuration lente est caractérisé par une vitesse de propagation de fissure V qui augmente avec le niveau de chargement appliqué KI , mais aussi avec le taux d'humidité relative et la température. De plus, la fissuration lente est dépendante de la microstructure, notamment de la taille de grain, voire de la présence de défauts comme des porosités aux points triples. Les ferrites auxquels nous nous intéressons possèdent une microstructure hétérogène vis-à-vis de la taille des grains et des porosités aux joints triples. Une telle microstructure conduit à une dispersion des mesures de fissuration lente $V-K$ telle, qu'elle ne permet pas de prédictions fiables de durée de vie à partir d'études expérimentales uniquement. Le recours à la simulation s'avère nécessaire à la fois pour élucider l'influence de la microstructure sur la rupture différée dans le temps et in fine pour estimer la durabilité du matériau à partir de prédictions $V-K$. Nous avons développé une description locale de la fissuration lente, à l'échelle de la microstructure qui est explicitement considérée. Dans le cadre d'une méthodologie de zones cohésives, à partir d'observations et de descriptions physico-chimiques disponibles et de calculs atomistiques récents, nous proposons un modèle cohésif viscoplastique pour mimer le mécanisme de réaction-rupture responsable de la fissuration lente. La description permet d'estimer des variations $V-KI$ conformes aux observations. Dans les simulations de la rupture intergranulaire de polycristaux pour un chargement de fatigue statique, nous observons que l'avancée de la fissure est discontinue dans le temps avec des vitesses qui varient en fonction de l'orientation des grains. Le franchissement des points triples ralentit notablement la progression de la fissure. Nous montrons qu'il est nécessaire de tenir compte des contraintes initiales d'origine thermique pour prédire une influence de la taille des grains sur la fissuration lente en accord avec les observations. Nos prédictions montrent que la présence de porosités n'est pas nocive d'un point de vue mécanique pour la fissuration lente, pour un environnement donné.

CHAMBART Marion, ENS Cachan

Directeur de thèse : R. Desmorat

Date de soutenance : 24 septembre 2009

Titre : Endommagement anisotrope et comportement dynamique des ouvrages en béton armé jusqu'à la ruine

Résumé : Cette thèse est dédiée au développement d'un nouveau modèle d'endommagement anisotrope pour le béton dans le cadre d'applications dynamiques. L'anisotropie induite de l'endommagement du béton est reproduite par une variable tensorielle d'ordre 2. Le modèle initial développé au LMT est étendu à la dynamique par l'introduction d'un « effet retard » dans la loi d'évolution de l'endommagement afin de reproduire l'effet de la vitesse sur le comportement du matériau. Cette dépendance temporelle du comportement permet de régulariser la solution qui dépend pathologiquement du maillage pour les modèles d'endommagement. L'influence de la vitesse de sollicitation sur la régularisation est étudiée, et les résultats sont comparés avec ceux obtenus par régularisation non-locale intégrale. Le cas des sollicitations alternées, fréquent du fait des propagations d'ondes est traité. On établit l'expression de la dissipation intrinsèque et on met en évidence l'existence d'un nouveau type d'instabilité, inhérente à l'aspect induit de l'anisotropie. Des simulations numériques d'impacts et de souffle sur des structures en béton armé illustrent les capacités du modèle. La description continue de l'endommagement permet de représenter finement l'amorçage et la propagation de fissures. Les résultats de simulations d'impact sont comparés à ceux des essais sur tour de chute réalisés (essai brésilien dynamique, essais sur poutres en béton armé).

LASRY Jérémie, INSA Toulouse

Directeurs de thèse : M. Salaün, Y. Renard

Date de soutenance : 22 octobre 2009

Titre : Calculs de plaques fissurées en flexion avec la méthode des éléments finis étendue (XFEM)

Résumé : Cette thèse est consacrée au développement de méthodes numériques pour la simulation de plaques et coques fissurées. Pour ce problème, les méthodes classiques sont basées sur la Méthode des Éléments Finis (MEF). En raison de la présence d'une singularité en fond de fissure, la MEF souffre de plusieurs défauts. Son taux de convergence n'est pas optimal : un raffinement du maillage près du fond de fissure est nécessaire pour représenter correctement cette singularité. De plus, en cas de propagation de la fissure, le domaine doit être remaillé. Une nouvelle méthode d'éléments finis, introduite en 1999 et baptisée XFEM, permet de s'affranchir de ces inconvénients. Dans cette méthode, la base éléments finis est enrichie par des fonctions de formes spécifiques qui représentent la séparation du matériau et la singularité de fond de fissure. Ainsi, domaine et fissure sont indépendants et le taux de convergence est optimal. Dans cette thèse, on développe deux formulations XFEM adaptées à un modèle de plaques minces. Ces méthodes ont pu être implémentées dans la bibliothèque d'éléments finis Getfem++, et testées sur des exemples où la solution exacte est connue. L'étude d'erreur montre que la méthode XFEM possède un taux de convergence optimal, alors que la MEF montre une convergence plus lente. L'autre contribution de cette thèse concerne le calcul de Facteurs d'Intensité de Contraintes (FIC) : ces grandeurs indiquent le risque de propagation de la fissure. Les méthodes classiques de calcul de FIC via la MEF sont basées sur des post-traitements appelés intégrale-J. Nous proposons deux méthodes de calcul originales, basées sur nos formulations XFEM. La première méthode utilise l'intégrale-J, et la deuxième fournit une estimation directe, sans post- traitement. Ces méthodes ont été testées sur deux cas-tests de référence et montrent une précision satisfaisante.

HU Wei, Centrale Lyon

Directeurs de thèse : P. Y. Hicher, C. Dano

Date soutenance : 27 octobre 2009

Titre : Contribution à l'étude de l'effet d'échelle dans les matériaux granulaires

Résumé : Ce travail apporte une contribution à la prédiction de l'effet d'échelle dans les milieux granulaires, effet lié à la rupture des particules. Une première campagne expérimentale, constituée d'essais triaxiaux sur des échantillons de 100mm, 500 mm et 1000 mm de diamètre de sable de Loire peu sensible à la rupture des grains pour les confinements appliqués, montre que le comportement mécanique pré-pic ne dépend pas du volume testé. Dans une seconde campagne expérimentale, on teste un matériau granulaire calcaire dont les grains présentent individuellement un comportement élastique fragile. Pour mettre en évidence l'effet d'échelle, trois granulométries

homothétiques sont reconstituées et utilisées pour préparer des échantillons de diamètre respectif 70 mm, 250 mm et 1000 mm. Les analyses granulométriques après cisaillement montrent clairement l'évolution des granulométries, signe de nombreuses ruptures. Cependant, la différence en termes de résistance et de comportement volumique n'est pas significative : contrairement à de nombreux matériaux, le calcaire utilisé présente la singularité suivante : l'indépendance de la contrainte à la rupture des particules individuelles en fonction de leur taille. Un modèle de comportement à double mécanisme, isotrope et déviatoire, basé sur le concept d'état critique, est également développé et prend en compte la rupture des particules. Enfin, des lois d'effet d'échelle sont proposées et validées sur des résultats publiés dans la littérature. On montre comment ces lois peuvent être utilisées à des fins de conception d'ouvrages comme des barrages en enrochement.

SAINT-SULPICE Luc, ENSIETA Brest

Directeurs de thèse : S. Calloch, S. Arbab Chirani

Date soutenance : 29 octobre 2009

Titre : Etude et Modélisation du Comportement Cyclique des Alliages à Mémoire de Forme

GOUEFFON Yann, Université Toulouse III

Directeurs de thèse : L. Arurault, C. Mabru

Date soutenance : 29 octobre 2009

Titre : Etude et simulation des mécanismes de dégradation de revêtements anodiques noirs sur alliage d'aluminium pour applications en environnement spatial

Résumé : En raison du vide spatial, la régulation thermique des véhicules spatiaux se fait de manière passive par échanges radiatifs entre ses surfaces externes et son environnement (Soleil, planètes, fond froid spatial...). C'est pourquoi les revêtements anodiques inorganiques noirs sur alliages d'aluminium sont couramment utilisés pour leur propriétés thermo-optiques ($\alpha_s > 0,93$; $\varepsilon_n > 0,9$), ainsi que pour éviter les réflexions parasites dans les instruments optiques. Par rapport aux peintures, ils présentent en outre l'avantage de limiter les risques de contamination des équipements proches, notamment par dégazage. Plusieurs cas d'écaillage de tels revêtements ont été observés après des cyclages thermiques, effectués pour simuler l'environnement spatial. En orbite, de telles particules pourraient contaminer un instrument du satellite. L'objectif de cette thèse est de comprendre quelles sont les causes de cette anomalie. Pour cela, il est nécessaire, dans un premier temps, de déterminer l'influence des paramètres d'élaboration sur les caractéristiques notamment mécaniques des films obtenus. Ensuite, il convient d'étudier le comportement thermomécanique de ses alliages anodisés noirs en environnement spatial. Le procédé d'élaboration est composé de quatre étapes principales : des prétraitements (dégraissage, décapage alcalin, neutralisation acide) ; une anodisation sulfurique générant un film poreux d'oxyde ; une coloration inorganique par immersion (précipitation de sulfures de cobalt dans la porosité de la couche) ; et un colmatage (hydratation pour fermer les pores et protéger les pigments). Des caractérisations ont été menées après chacune de ces étapes afin d'étudier leur influence respective sur la microstructure et la composition du revêtement. Il a été montré notamment qu'une faible augmentation de la température d'anodisation conduisait à l'augmentation de la porosité initiale du film. Les propriétés thermomécaniques des films anodiques noirs ont été déterminées expérimentalement. Ainsi, le module de Young, les contraintes résiduelles, la contrainte à rupture ou encore le coefficient de dilatation thermique ont tous pu être déterminés en fonction de la porosité du film. Il a en particulier été démontré que les contraintes de traction au sein du film dues à l'insertion de pigments sont importantes et, selon la porosité initiale du film, peuvent mener au faïençage. Les dilatations différentielles entre film et substrat durant le colmatage à 98°C sont également susceptibles de mener à la fissuration du film. Le comportement de ces revêtements lors de cyclages thermiques et les mécanismes conduisant à l'écaillage ont ensuite été étudiés. L'adhérence des films a ainsi été évaluée par différents essais (pelage, rayure, flexion quatre points) après vieillissements sous différentes conditions. Il a été mis en évidence expérimentalement que les contraintes générées par les dilatations différentielles ajoutées à la déshydratation favorisent la propagation de fissures pouvant générer l'écaillage du film. Un modèle

éléments finis a été mis en place pour affiner la compréhension des mécanismes intervenant durant la propagation de fissures. Ainsi, la bifurcation des fissures ainsi que leurs propagations parallèlement à l'interface ont pu être expliquées notamment par l'apparition de sollicitations en cisaillement (mode II) des fissures à basse température.

DERICQUEBOURG Thomas, INSA Toulouse

Directeurs de thèse : M. Sartor, L. Jézéquel

Date soutenance : 29 octobre 2009

Titre : Méthodologie de conception préliminaire robuste des assemblages vissés basée sur des modèles de pré-dimensionnement

Résumé : Dans un contexte de réduction continue des temps de conception, il est primordial d'effectuer des choix pertinents en amont des projets pour limiter les remises en cause tardives, synonymes de perte de temps, et pour permettre une conception simultanée efficace des différents éléments en jeu. Les phases d'avant-projet étant caractérisées par de nombreuses incertitudes et indéterminations des paramètres principaux, les choix réalisés en amont doivent alors être robustes face aux potentielles variations des données et des paramètres au cours du processus de conception. Concernant les assemblages vissés, éléments largement utilisés dans le domaine automobile pour relier différentes pièces qui nécessitent de pouvoir être démontées, les outils nécessaires pour réaliser leur pré-dimensionnement manquent. En effet, bien que de nombreux modèles existent, ils sont essentiellement mono-vis, dédiés à certaines applications précises ou alors trop lourds pour être utilisés en avant-projet. C'est pourquoi une méthodologie de conception préliminaire robuste des assemblages vissés a été développée. La mise en place de cette méthodologie a nécessité le développement d'un modèle local générique d'une liaison vissée et d'une approche globale permettant de prendre en compte des assemblages multi-vis. Ces développements ont été réalisés avec un souci permanent de limitation des temps de calcul pour qu'ils puissent ensuite être intégrés dans une stratégie de conception préliminaire robuste. La méthodologie de conception préliminaire robuste des assemblages vissés se base alors sur un modèle local de pré-dimensionnement qui permet de décrire le comportement complexe d'une liaison vissée de manière quasi-instantanée. Ce modèle local est suffisamment générique pour traiter plusieurs types de pièces et son domaine d'application a été clairement défini pour connaître ses limites. La méthodologie se base ensuite sur un modèle global qui permet de prendre en compte les assemblages multi-vis et donc les interactions entre les différentes liaisons. Cette approche globale permet de décrire le comportement d'un assemblage constitué de plusieurs vis et a été validée sur une famille d'assemblages vissés spécifiée. Enfin, à partir de ces modèles de pré-dimensionnement développés, une stratégie de préconception robuste a été mise en place. Cette stratégie consiste à balayer différentes configurations possibles pour concevoir un assemblage vissé et à estimer les risques de défaillances ainsi que les coûts prévisionnels associés. Elle met en œuvre des plans d'expériences optimisés ainsi qu'une démarche de regroupement de solutions innovante afin de pouvoir donner des préconisations de forme de l'assemblage et ainsi guider la phase suivante de conception détaillée. Cette méthodologie permet au final de donner, en un temps réduit, un ensemble d'informations pertinentes sur les risques de défaillances des configurations potentielles ainsi que sur leurs coûts prévisionnels afin que le concepteur puisse faire un choix réfléchi de configuration d'un assemblage vissé en phase avant-projet avec une maîtrise du risque et du coût.

GENTET David, CEA Cadarache – Université La Rochelle

Directeurs de thèse : X. Feugas, P. Pilvin, Y. Lejeail

Date soutenance : 4 novembre 2009

Titre : Compréhension et modélisation du comportement cyclique anisotherme de l'acier austénitique AISI 316L(N)

Résumé : Le principal objet de ce travail de thèse est de proposer une modélisation mécanique du comportement cyclique de l'acier inoxydable austénitique AISI 316L(N) à hautes températures (550K-900K). Dans ce domaine, de nombreux phénomènes liés au vieillissement dynamique (DSA)

et à la formation de structures de dislocations dipolaires apparaissent. Des essais isothermes et anisothermes en fatigue uni-axiale ont été conduits afin de vérifier certains points concernant les effets de la température sur le comportement mécanique. L'étude des boucles d'hystérésis mécanique et l'observation des structures de dislocations ont permis d'établir la présence de deux régimes de DSA lors d'essais isothermes. L'effet de mémorisation d'une sollicitation à haute température est mis en évidence lors de séquences de température particulières. Il est montré que l'augmentation de l'amplitude de contrainte lors d'un passage à « haute température » est liée au second régime de DSA, c'est-à-dire à l'augmentation des efforts à courte distance agissant sur les jonctions entre dislocations (ségrégation du chrome), ainsi qu'à l'absence de restauration des structures dipolaires à basse température. À partir de l'analyse expérimentale des mécanismes de DSA et de restauration, un modèle anisotherme macroscopique est développé en considérant des variables internes physiques (densités de dislocations). Les équations d'une modélisation polycristalline sont simplifiées afin d'obtenir un modèle à deux échelles utilisable dans un code de calcul par éléments finis. Dans le domaine 550K-873K, les résultats obtenus sont cohérents avec les observations macroscopiques et microscopiques d'essais en fatigue, de relaxation et de rochet en traction-torsion.

NICAISE Nicolas, Université Metz

Directeurs de thèse : M. Berveiller, S. Berbenni

Date soutenance : 6 novembre 2009

Titre : Effets de longueur interne sur les propriétés effectives des polycristaux métalliques : applications aux aciers

Résumé : Ce travail a pour but d'étudier les effets des longueurs internes, comme la taille des grains, sur le comportement mécanique des aciers IF par le biais de modélisations micromécaniques. Après une revue bibliographique des différents effets d'échelle observés en plasticité (effet taille des grains) et de quelques méthodes de transition d'échelle existantes, ce travail se décompose en trois étapes. Dans un premier temps, un schéma auto-cohérent écrit dans le cadre de l'élastoviscoplasticité est utilisé afin d'étudier les effets de la dispersion de taille de grain sur le comportement mécanique d'agrégats polycristallins, en négligeant les hétérogénéités d'origine cristallographique. Ces effets sont aussi importants que ceux de la taille moyenne des grains et de la texture cristallographique. Dans un second temps, le même schéma de transition d'échelle est utilisé afin d'étudier les effets combinés de la dispersion de taille de grain et des orientations cristallographiques. Il apparaît alors que l'effet de la dispersion de taille de grain est effectivement plus important que l'effet de la texture cristallographique sur le comportement mécanique en traction. Néanmoins, la dispersion de taille de grain n'a que peu d'effet sur l'anisotropie plastique des aciers IF. La troisième étape consiste à développer de nouvelles approches, à champs de déformation non uniformes dans les grains, afin de capter des effets de taille de grain par le biais de nouvelles lois d'interaction. Ainsi, deux différentes modélisations à longueurs internes sont proposées : l'une "discrète", considérant des distributions de dislocation contrainte au joint de grain, et l'autre "moyenne", avec la prise en compte d'un gradient de déformation plastique dans une zone près du joint de grain. Ces nouvelles approches permettent de reproduire les effets de taille de grain sur le comportement mécanique des matériaux métalliques, en particulier pour les aciers IF.

HENRI Marc, Mines - Cemef

Directeur de thèse : M. Bellet

Date soutenance : 10 novembre 2009

Titre : Modélisation 3D thermomécanique du refroidissement primaire lors de la coulée continue d'aciers

ZHENG Yuanyuan, Université Lille I

Directeur de thèse : A. Zaoui

Date soutenance : 10 novembre 2009

Titre : Modélisation et simulation à l'échelle nanométrique de l'effet de température, de pression et des polluants sur l'argile hydratée de type montmorillonite

Résumé : Les sols argileux sont très présents à la surface de la terre et ont de grands impacts sur une large variété de processus d'environnement et d'ingénierie. Le gonflement ou dégonflement de l'argile peut causer des dégâts parfois importants aux constructions. Cependant, grâce à leur capacité de gonflement, leur faible perméabilité et leur grande aptitude de conservation des cations dans les espaces interlamellaires, les argiles gonflantes peuvent être utilisées pour le stockage de déchets radioactifs. Dans cette thèse, les méthodes de Monte Carlo et Dynamique Moléculaire ont été utilisées pour étudier l'argile hydratée de type Wyoming-montmorillonite. Le bon accord de nos résultats de simulation concernant l'argile contenant Li^+ , Na^+ , K^+ et Ca^{2+} avec les résultats expérimentaux et d'autres travaux théoriques nous a permis d'étendre notre étude à l'argile comportant des ions métalliques lourds, comme Rb^+ , Cs^+ , Ni^{2+} , Zn^{2+} et Pb^{2+} . Par ailleurs, les sols argileux se rétractent en période de sécheresse sous l'effet d'importante température, ce qui se traduit par des tassements différentiels qui peuvent occasionner des dégâts aux constructions. A cet effet nous avons examiné le comportement du gonflement et du dégonflement de la montmorillonite sous l'effet de la température, de la teneur en d'eau et de la nature des différents cations. Un phénomène d'hystérésis a été constaté pendant le processus de gonflement/dégonflement ainsi que durant le processus de chauffage/refroidissement. La quantité de cations et leur capacité d'attraction ont un rôle important dans le processus de gonflement et du dégonflement de cette argile. En outre, l'étude de la diffusion de l'eau et des cations dans l'espace inter-lamellaire de la montmorillonite montre l'effet du degré d'hydratation et de la nature des cations (en particulier les polluants) sur la diffusion de l'eau, ainsi que l'effet de la température sur la diffusion des particules présentes dans les inter-couches. Enfin l'étude détaillée de l'effet de la pression sur la montmorillonite montre la variation de la rigidité en fonction de la teneur en eau et permet de prédire des transitions de phase structurales inférieures à 1 GPa. Cette étude montre particulièrement que le module de rigidité peut atteindre des valeurs extrêmement élevées à des pressions relativement modestes d'environ 20 GPa. Ce résultat ouvre clairement la voie pour une nouvelle famille de matériaux ultra incompressible (et éventuellement ultra dures) composés d'argiles. Ce type de matériaux aux propriétés mécaniques spécifiques et de faibles coûts (abondance des argiles), peut être particulièrement attractif pour de nombreuses applications dans divers domaines.

NGUYEN Thai Ha, Centrale Lille

Directeurs de thèse : S. Degallaix, C. Niclaey, S. Marie

Date soutenance : 19 novembre 2009

Titre : Prédiction de la non-rupture fragile dans un joint soude en acier C-Mn dans le domaine de la transition fragile/ductile

Résumé : Ce travail de thèse s'inscrit dans le contexte de la sûreté nucléaire, et plus précisément, de l'intégrité des circuits secondaires des Réacteurs à eau pressurisée (REP). Le problème posé est celui de la rupture d'une structure tubulaire de quelques millimètres d'épaisseur en acier ferritique peu allié, comportant de nombreuses soudures d'aboutement, l'acier ferritique en question et sa soudure présentant une zone de transition de ténacité fragile/ductile. De plus, les soudures présentent, au niveau du bourrelet de soudage, une géométrie propice à l'apparition de fissures de fatigue, dû aux vibrations et dilatations de l'ensemble. Ces fissures entraînent le risque de rupture totale du composant. L'objectif de la thèse est d'établir un critère de non rupture par clivage de structures minces soudées en acier ferritique, applicable aux structures réelles. L'étude porte donc sur le comportement à rupture de structures minces soudées dans le domaine haut de la transition fragile/ductile. Elle a pour objectif de développer le modèle en contrainte seuil initialement développé par Chapuliot, qui permet de prédire la non-rupture par clivage de cette structure soudée. Le modèle est identifié pour la soudure de l'acier au C-Mn de construction nucléaire, en s'intéressant plus particulièrement à la limite supérieure du domaine de transition. Une contrainte seuil, en-dessous de laquelle le clivage ne peut avoir lieu, est identifiée à partir d'essais de traction à

basses températures sur éprouvettes axisymétriques entaillées prélevées dans le joint soudé. Cette contrainte seuil permet de définir le volume seuil, ou volume dans lequel les contraintes principales maximales dépassent la contrainte seuil au cours de l'essai. L'analyse au MEB des faciès des éprouvettes rompues montre que la zone fondue brute de solidification dans la ZAT est la zone la plus susceptible de cliver. La relation entre la probabilité de rupture fragile et le volume seuil dans cette zone est établie via une fonction de sensibilité, grâce à des essais sur éprouvettes CT et à leur simulation multi-matériaux. Le modèle ainsi identifié est testé pour prévoir la non rupture par clivage d'éprouvettes SENT prélevées dans le joint soudé et sollicitées en traction. Les résultats obtenus sont encourageants relativement à la transférabilité du modèle à la structure réelle.

ABRIVARD Guillaume, Mines Paris

Directeurs de thèse : E. Busso, S. Forest

Date soutenance : 20 novembre 2009

Titre : Formulation couplée plasticité cristalline - champ de phase pour décrire l'évolution de la microstructure d'agrégats polycristallins au cours de la recristallisation

Résumé : During thermo-mechanical processing, the strain energy stored in the microstructure of an FCC polycrystalline aggregate is generally reduced by physical mechanisms which rely, at least partially, on mechanisms such as dislocation cell or grain boundary motion which occur during recovery, recrystallisation or grain growth. The aim of this work is to develop a constitutive framework capable of describing the microstructural evolution driven by grain boundary curvature and/or stored energy during recrystallisation and grain growth. As recrystallisation processes depend primarily on the nature of the microstructural state, an accurate prediction of such phenomena requires that the microstructural heterogeneities which develop just before recrystallisation be properly described. These heterogeneities may consist of structures such as dislocation cells and pile-ups, shear and twin bands. The microstructural characteristics present in a polycrystal aggregate just before the onset of thermal recrystallisation are first reproduced numerically. The constitutive behaviour of each grain in the aggregate is described using a dislocation mechanics-based crystallographic formulation which accounts for non-local effects through the introduction of geometrically necessary dislocations. The single crystal model is implemented into the finite element method using a finite-strain kinematics framework. Different measures of stored internal strain energy are determined based on the dislocation density distribution in the aggregate. The minimisation of stored and grain boundary energies provides the driving force for grain boundary motion. To describe the interface motion, a phase field model taking into account the stored energy distribution is formulated and implemented within a continuum mechanics framework. A weak coupling between the grain boundary kinematics and the crystal plasticity model is made through the dislocation densities and the grain orientations. Furthermore, the parameters of the free energy are calibrated based on published Read-Shockley boundary energy data. To validate the proposed model, a polycrystalline aluminium aggregate is first cold deformed under plan strain conditions and then annealed. The predicted recrystallised material volume fraction evolution with respect to time was found to have the same dependence on deformation level and temperature as that reported in the literature. The implications of such findings for future developments are discussed.

LECOMTE-GROBRAS Pauline, Centrale Lille

Directeurs de thèse : M. Brieu, G. de Saxcé

Date soutenance : 25 novembre 2009

Titre : Utilisation de la technique de corrélation d'images pour l'étude des effets de bord dans les composites stratifiés

Résumé : La conception et le dimensionnement des structures stratifiées sont aujourd'hui globalement maîtrisés grâce à la théorie classique des stratifiés. Cependant, les problèmes de délaminage près des bords libres et des jonctions posent encore de nombreuses difficultés. En effet, dans ces zones, la discontinuité des propriétés mécaniques entre les plis d'orientation différente

engendre des contraintes tridimensionnelles aux interfaces interlaminaires. L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement les effets de bords et de mettre en évidence les paramètres susceptibles de les influencer. Pour cela la démarche a consisté à définir un protocole de mesure par corrélation d'images des champs cinématiques, à l'échelle des plis (échelle mésoscopique), sur le bord libre d'éprouvettes stratifiées sollicitées en traction. Trois matériaux de propriétés mécaniques et de microstructures différentes ont été étudiés ainsi que deux géométries d'éprouvettes : planes et avec sauts de plis. Des calculs par éléments finis ont permis de définir la séquence d'empilement $[(15/-15)_2]_s$, induisant les phénomènes d'effet de bord les plus importants susceptibles d'être plus facilement mesurables. Cette étude a permis de montrer l'existence de gradients de déplacements et de pics de déformations de cisaillement au voisinage des interfaces interlaminaires dont l'intensité dépend des gradients de propriétés mécaniques, de l'épaisseur de l'interface interlaminaire, et de la présence d'une discontinuité géométrique. D'autre part, les observations montrent l'apparition de fissures aux interfaces fibre / matrice à l'échelle microscopique le long des interfaces interlaminaires qui se traduisent à l'échelle mésoscopique par une évolution non linéaire du cisaillement.

MENDOZA DELGADO Johnny Angel, Université Lille I

Directeurs de thèse : A. Pertus, J. Lesage, D. Chicot

Date soutenance : 26 novembre 2009

Titre : Détermination des propriétés mécaniques et des lois de comportement en fluage par indentation instrumentée

Résumé : Le développement de nouveaux matériaux nécessite la détermination de leurs propriétés mécaniques aux échelles macro, micro et nanométriques. Parmi les méthodes expérimentales les plus courantes, l'essai d'indentation instrumenté permettant de déterminer le module d'élasticité et la dureté du matériau à toutes ces échelles de mesure est sans doute le plus utilisé. Cependant, les valeurs obtenues en micro et en nanoindentations sont souvent en apparente contradiction. Cela a conduit de nombreux auteurs à s'interroger sur la validité des mesures expérimentales, sur l'identification des processus physiques mis en jeu lors de l'enfoncement de l'indenteur ou encore sur la pertinence des propriétés mesurées et des échelles de mesure. Sans prétendre étudier tous les aspects de ce problème complexe, nous proposons cependant quelques pistes de réflexion en particulier sur le passage nano/micro en dureté. Sur la base de la théorie du gradient de plasticité développé par Nix et Gao, nous définissons un facteur d'échelle qui relie certaines données expérimentales à des propriétés fondamentales du matériau. Nous montrons également que ce facteur d'échelle, capable de caractériser la résistance à la déformation plastique, peut donner des informations complémentaires pour étudier le comportement des matériaux soumis à différentes conditions d'indentation. Dans une deuxième partie, nous étudions le fluage par indentation comme une alternative aux essais classiques de fluage qui durent généralement plusieurs mois. Même si le résultat ne répond pas complètement aux objectifs fixés, nous montrons qu'un modèle rhéologique adapté permet de retrouver le module d'élasticité et de calculer un coefficient de viscosité à température ambiante du matériau.

GAUBERT Anaïs, Mines Paris

Directeurs de thèse : S. Forest, F. Gallerneau, A. Finel

Date soutenance : 30 novembre 2009

Titre : Modélisation des effets de l'évolution microstructurale sur le comportement mécanique du superalliage monocristallin AM1

Résumé : Ce travail s'inscrit dans le contexte de la modélisation et de la prévision de la durée de vie des aubes de turbines haute pression des moteurs aéronautiques. Ces pièces sont réalisées en superalliage monocristallin base nickel tel que l'AM1, matériau de l'étude. Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressés aux évolutions microstructurales se produisant à haute température sous chargement mécanique connues sous le nom de coalescence orientée des précipités. Ce travail a consisté, dans un premier temps, à étudier le comportement du matériau non-

vieilli. Des essais à 950°C ont été réalisés afin d'enrichir la base d'essais existante. Ils ont permis l'identification d'un modèle de viscosité de type sinus hyperbolique sur une large gamme de vitesses de sollicitations. Le comportement initial du matériau a également été étudié à l'échelle mésoscopique (échelle des phases). Un modèle de comportement a été identifié pour chacune des phases afin de reproduire le comportement macroscopique du matériau. Cette étude, effectuée dans le cadre de la viscoplasticité classique a permis de mettre en évidence les limites de cette approche. Notamment, elle ne permet pas de modéliser les effets d'échelle observés en plasticité. Parallèlement, nous nous sommes intéressés au phénomène de coalescence orientée, tant d'un point de vue expérimental que numérique. Des essais mécaniques après vieillissement ont été réalisés. Différentes conditions de vieillissement ont été étudiées, en fluage à différentes températures et contraintes et suivant différentes orientations cristallographiques mais également sous chargement cyclique. Les essais mécaniques ont montré un effet prépondérant de la coalescence orientée sur l'écroutissage du matériau, allant dans le sens d'un adoucissement. La coalescence orientée a également été modélisée par la méthode des champs de phases. Nous avons proposé un couplage du modèle champs de phases avec un modèle de comportement de viscoplasticité cristalline afin de prendre en compte l'influence de l'activité plastique dans les couloirs de matrice. Les simulations ont montré une accélération de la cinétique de mise en radeaux due à la plasticité ainsi que des précipités ayant une forme plus réaliste vis-vis de l'expérience, notamment en vieillissement sous chargement cyclique lent. La prise en compte des effets de la coalescence orientée passe par la modélisation des effets d'échelle en plasticité. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés aux milieux continus généralisés. Nous avons étudié analytiquement les effets d'échelle produits par un modèle de Cosserat et le modèle microcurl dans le cas d'un matériau biphasé en cisaillement. Les deux modèles prévoient un écroutissage cinématique linéaire dépendant de la taille de la microstructure. Enfin, les développements précédents et les essais réalisés dans le cadre de ce travail ont permis la construction et l'identification d'un modèle macroscopique étendu qui rend compte des effets de la coalescence orientée sur le comportement mécanique de l'AM1.

GREZE Renaud, Université Bretagne Sud

Directeurs de thèse : P.Y. Manach, H. Laurent

Date soutenance : 30 novembre 2009

Titre : Etude expérimentale et numérique du retour élastique des alliages d'aluminium après emboutissage

Résumé : Cette étude, réalisée dans le cadre d'une thèse co-financée par la région Bretagne et l'Union Européenne, a pour objectif l'étude expérimentale et numérique du retour élastique après emboutissage. Ce phénomène, néfaste aux procédés de mise en forme dans le contexte industriel, modifie la forme finale des pièces fabriquées. Le retour élastique est issu des contraintes résiduelles, engendrées lors de la mise en forme, qui se relaxent lors du retrait des outils et des différentes étapes de découpe. L'étude porte sur deux alliages d'aluminium : Al5754-O et Al6016-DR130-T4. Leur caractérisation mécanique est réalisée à partir d'essais de traction et de cisaillement monotone et cyclique, afin de mesurer l'effet Bauschinger. La détermination des paramètres matériaux de lois de comportement élastoviscoplastiques à écroutissage isotrope et mixte, associés à des critères de plasticité isotrope ou anisotrope, a été réalisée. Des essais d'emboutissage de godets cylindriques ont été effectués à température ambiante pour les deux matériaux. Le retour élastique est mis en évidence après la découpe d'un anneau dans le mur d'un godet, puis l'ouverture de celui-ci. Différents paramètres expérimentaux comme l'effort de serre-flan et la vitesse d'avance du poinçon ont été étudiés dans le cas de l'alliage d'aluminium Al6016. Ces essais ont permis de constituer une base de données expérimentale conséquente pour les deux matériaux. La modélisation du procédé d'emboutissage a été réalisée avec le code de calcul par éléments finis Abaqus, ainsi que la prédiction du retour élastique. Plusieurs paramètres numériques comme le type d'éléments finis, la forme du maillage ou le procédé de découpe numérique, ont été étudiés. Cela a permis d'établir une configuration numérique de référence pour tester l'influence de la loi de comportement sur la modélisation du procédé d'emboutissage et la prédiction du retour élastique. Un dernier aspect

envisagé dans notre étude concerne l'influence de la température sur le procédé de mise en forme et le retour élastique. La température joue un rôle important lors des différentes phases de mise en forme, engendrant une importante diminution des efforts mis en jeu et également du retour élastique. L'étude porte sur l'alliage d'aluminium Al5754 et sur une gamme de température comprise entre 25_C et 200_C. La modélisation des effets de la température est réalisée en utilisant un modèle de comportement élastoviscoplastique à écrouissage isotrope prenant en compte la température et couplé à un critère de plasticité isotrope.

VU Quoc Huy, ENSMA Poitiers

Directeurs de thèse : D. Halm, Y. Nadot

Date soutenance : 2 décembre 2009

Titre : Fatigue polycyclique multiaxiale de l'acier C35 : caractérisation et modélisation des mécanismes d'endommagement

Résumé : Cette étude est dédiée à établir un outil de prédiction de durée de vie pour un métal polycristallin soumis à des chargements multiaxiaux complexes en fatigue à grand nombre de cycles. Afin d'appréhender les mécanismes de plasticité et d'endommagement à modéliser, une campagne d'expériences menées sur un acier type C35 est effectuée dans la première partie de l'étude. Les options de modélisation sont choisies en lien avec cette caractérisation précise des mécanismes. La modélisation s'intéresse à la prévision à la fois du domaine de l'endurance infinie et celui de la durée de vie limitée ($10^5 - 10^7$ cycles). Afin de répondre au premier objectif, un critère de fatigue multiaxiale basé sur des invariants des contraintes est proposé. Malgré une formulation simple, les confrontations du critère avec une large base de données sont satisfaisantes. En ce qui concerne le deuxième objectif, afin de dépasser une description purement phénoménologique, un modèle d'endommagement à deux échelles (macro – méso) intègre le critère proposé et est construit dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles permettant de traduire le plus fidèlement possible les mécanismes de dégradation à l'échelle mésoscopique ainsi que de capter l'effet de déphasage et le cumul non linéaire du dommage. Au-delà des chargements à amplitude constante, le caractère incrémental du modèle offre la possibilité de traiter des chargements à amplitude variable.

KLIMKEIT Bert, ENSMA Poitiers

Directeurs de thèse : S. Castagnet, Y. Nadot

Date soutenance : 3 décembre 2009

Titre : Etude expérimentale et modélisation du comportement en fatigue multiaxiale d'un polymère renforcé pour application automobile

Résumé : Le comportement en fatigue des pièces automobiles en thermoplastique renforcé par des fibres courtes est un sujet de recherche récent pour lequel il est nécessaire de produire des résultats expérimentaux mais aussi des modélisations afin d'aider les ingénieurs du bureau d'étude à concevoir des pièces sûres. Notre travail s'inscrit dans ce contexte et a été mené en collaboration avec la société RENAULT. Dans ce cadre, nous avons mené une étude expérimentale visant à déterminer les mécanismes d'endommagement par fatigue pour des chargements multiaxiaux. Sur la base de cette étude expérimentale, un critère de fatigue a été proposé. L'utilisation de plusieurs techniques expérimentales (cryofractures, suivi de l'endommagement par répliques, thermographie, évolution des grandeurs mécaniques) nous a permis de proposer un scénario des mécanismes d'endommagement par fatigue dans le PBTPET. Nous avons pu mettre en évidence le rôle négatif, vis-à-vis de la tenue en fatigue, de l'extrémité des fibres qui ne sont pas enzymées. Par ailleurs, les concentrations de contrainte au bout des fibres semblent jouer un rôle plus important que la contrainte de cisaillement à l'interface fibre matrice. Cette dernière joue un rôle probable sur l'endommagement mais ceci est du à la répartition spatiale des fibres plus qu'à la différence de comportement des matériaux. Sur la base des mécanismes observés, un critère de fatigue a été proposé. Ce critère prend en compte les effets de chargements multiaxiaux incluant le rapport de charge ainsi que l'orientation des fibres. Le critère en lui-même est précédé d'une démarche

micromécanique ayant pour objectif de décrire de façon analytique les champs mécaniques locaux. Cette démarche détermine des champs moyens mais des extensions sont envisageables. L'identification du critère proposé nécessite deux courbes S-N ainsi que les propriétés de base des constituants. Avec ces ingrédients, la démarche de modélisation proposée permet de décrire de façon prédictive les effets de triaxialité, de rapport de charge et d'orientation des fibres. Le modèle proposé est enfin intégré dans une chaîne complète de dimensionnement en fatigue (procédé-fatigue) qui permettra à terme d'optimiser un composant vis-à-vis de sa tenue en service.

LANDREAU Matthieu, Université Orléans

Directeur de thèse : A. Gasser

Date soutenance : 4 décembre 2009

Titre : Modélisation thermomécanique d'un piédroit de four à coke

Résumé : Inscrite dans le cadre du projet européen Coke Oven Operating Limits, cette thèse porte sur la modélisation thermomécanique d'un piédroit de cokerie. Le piédroit est une maçonnerie alvéolaire, chauffée par des gaz à haute température (supérieure à 1200°C). Pendant la cuisson du charbon dans les fours à coke, celui-ci se pyrolyse en coke provoquant une poussée sur les paneresses du piédroit. Ce projet a pour objectif de déterminer la pression maximale supportée par ces structures. Afin de répondre à cette problématique, un nouveau modèle thermomécanique de piédroit a été développé. Ce travail prend en compte à la fois le comportement non-linéaire de la maçonnerie, mais également les interactions avec l'environnement extérieur. La modélisation de la structure maçonnée est basée sur une approche macroscopique où les briques et le mortier sont remplacés par un matériau homogène équivalent, et ce pour différents états de joints. La non-linéarité du comportement est reproduite grâce à un critère d'ouverture qui permet de passer d'un état de joint à un autre. Les propriétés homogénéisées sont identifiées selon une approche énergétique couplée à un algorithme d'identification inverse. Plusieurs simulations numériques d'essais issus de la littérature ont permis de valider cette approche. Les paramètres régissant le comportement mécanique et thermique des matériaux sont déterminés expérimentalement ainsi que la tenue de l'interface brique/mortier. Les conditions aux limites du modèle sont établies à l'aide d'une instrumentation thermomécanique sur site industriel. Les simulations thermomécaniques du piédroit permettent de localiser des phénomènes de dégradation observés dans les faits.

BENABBES Anouar, Université Reims

Directeur de thèse : L. Siad, L. Dormieux

Date soutenance : 4 décembre 2009

Titre : Approches micromécaniques de la compaction de poudres et de la rupture ductile des matériaux incluant le troisième invariant des contraintes.

Résumé : Ce travail de thèse englobe deux thématiques de recherche que sont, d'une part, la modélisation micromécanique de la compaction de poudre consistant à construire des critères de rupture macroscopiques basés sur l'homogénéisation en calcul à la rupture, d'autre part, l'approche locale de la rupture ductile des matériaux avec prise en compte des effets du troisième invariant des contraintes. (A) Dans la première partie du mémoire, la méthode cinématique du calcul à la rupture est utilisée pour la construction de bornes supérieures des critères de rupture macroscopiques d'un matériau granulaire et ce, pour des densités relatives variant entre 0,7 et 0,95. Pour ce faire, le milieu granulaire est assimilé à un milieu constitué d'un assemblage périodique de cellules cylindriques à base hexagonale. En premier lieu, une cellule de base primitive consistant en un cylindre circulaire dans lequel un grain est circonscrit et dont la hauteur est égale au diamètre de ce dernier est employée dans des analyses aux éléments finis qui renseignent en particulier sur les modes de déformation du grain solide. En deuxième lieu, huit mécanismes de rupture pertinents de cellules de base aux géométries appropriées permettent d'obtenir des estimations par l'extérieur des surfaces de charge macroscopiques. Les calculs sont menés aussi bien pour la compression isostatique que pour la compression en matrice. Les résultats ainsi obtenus sont confrontés à ceux fournis par des calculs aux éléments finis effectués directement sur la cellule de base primitive. (B)

Un modèle de comportement élasto-plastique pour matériaux poreux basé sur le critère de McElWain et al. (2006) est implantée avec succès dans le code ABAQUS. Ce modèle a la particularité de prendre en compte directement dans le potentiel plastique le troisième invariant des contraintes. La striction d'une barre cylindrique lisse, la traction d'une éprouvette entaillée et le cisaillement en déformation plane ont été simulés numériquement en utilisant le modèle de McElWain et al. et les résultats obtenus sont confrontés à ceux dérivés du modèle GTN. La différence des réponses auxquelles conduisent les deux modèles de comportement est plus importante durant la phase d'adoucissement du matériau.

REGRAIN Cédric, Mines Paris

Directeur de thèse : L. Laiarinandrasana

Date soutenance : 7 décembre 2009

Titre : Comportement, Endommagement et Fissuration par Fluage du Polyamide 6 : Etude Expérimentale et Modélisation

Résumé : Le PolyAmide 6 (PA6) est un polymère semi-cristallin couramment utilisé dans des structures sollicitées en fluage. A température ambiante, le PA6 présente une viscosité importante. L'objectif de cette étude consiste à analyser d'une part, le comportement mécanique du PA6, et d'autre part de comprendre les mécanismes d'amorçage et de propagation de fissures, sous chargement statique à température ambiante. Des essais mécaniques ont été réalisés sur éprouvettes axisymétriques lisses et entaillées, avec différents rayons en fond d'entaille. Des courbes contraintes / déformations ont été obtenues à partir d'essais de traction monotone, à différentes vitesses de chargement. Ensuite, des essais de fluage ont été réalisés pour décrire l'évolution de la déformation de fluage en fonction du niveau de contrainte appliquée. Un stade de fluage secondaire stabilisé a d'ailleurs été observé et deux régimes de vitesse de déformation de fluage, dépendant du niveau de contrainte appliquée, ont été mis en évidence. Des observations microscopiques, après cryofractographie, ont permis de révéler la microstructure sphérolitique initiale du PA6 de l'étude. Une porosité initiale de 1,5% a également été mise en évidence. Les analyses réalisées, à la suite d'essais interrompus ou sur des faciès de rupture, ont permis de mettre en évidence les mécanismes de déformation et d'endommagement. Aussi, les observations des faciès de rupture ont clairement mis en évidence les mécanismes de transition entre les zones ductiles et la rupture finale fragile. Il semblerait enfin que le régime ductile, basé sur la croissance et la coalescence des cavités, évolue différemment en fonction du taux de triaxialité des contraintes. Les essais de fluage sur éprouvettes lisses ont permis l'identification des paramètres matériaux nécessaires aux modélisations analytique et par Eléments Finis. Des modèles multimécanismes, physiquement motivés et dédiés au calcul par Eléments Finis, sont proposés, prenant en compte le taux de cristallinité. On se propose d'utiliser les outils de la Mécanique Non Linéaire de la Rupture pour estimer la durée de vie d'une structure : l'approche globale permet d'établir une courbe maîtresse reliant le temps à rupture au paramètre de chargement C^* . Les résultats des essais sur éprouvettes fissurées ont permis de calculer le paramètre C^* . Enfin des modèles multimécanismes, physiquement motivés et dédiés au calcul par Eléments Finis, ont été développés pour modéliser le comportement de structures en PA6. Une modélisation couplée entre comportement et endommagement a été proposée afin de tenter de prendre en compte l'ensemble des résultats et conclusions apportées dans les thématiques précédentes. L'utilisation de la Mécanique des Milieux Poreux permet notamment de simuler la croissance des cavités lors du régime de fissuration ductile. L'influence des coefficients relatifs à l'endommagement a été décrite. L'accès aux variables locales ainsi qu'aux tenseurs des contraintes et déformations, propres aux phases amorphe et cristalline, est possible : l'évolution de la porosité propre à chaque phase a ainsi été analysée, en comparaison des mécanismes d'endommagement précédemment décrits.

VOR Kokleang, ENSMA Poitiers

Directrices de thèse : C. Gardin, C. Sarrazin-Baudoux

Date soutenance : 11 décembre 2009

Titre : Etude expérimentale et modélisation numérique de la fermeture de fissures longues et courtes

dans un acier inoxydable 304L

Résumé : Cette thèse s'inscrit dans le cadre général de l'étude de la dégradation par fatigue des structures nucléaires. Dans un premier temps, des essais de propagation d'une fissure longue par fatigue ont été menés sur des éprouvettes CT et SENT, dans l'acier inoxydable austénitique 304L, pour différentes conditions d'essai. Les influences d'une pré-déformation initiale ainsi que de l'histoire du chargement sur le niveau de fermeture ont été mises en évidence et quantifiées. La comparaison d'essais sous air et sous vide a également permis de confirmer les effets d'environnement. Un second volet expérimental a porté sur la propagation d'une fissure courte pour différentes amplitudes constantes du facteur d'intensité de contraintes, avec un rapport de charge $R = 0,1$, sous air. La fermeture a été mesurée pour différentes longueurs de fissure obtenues par usinage progressif du sillage plastique puis par propagation d'une fissure courte 2D. Une méthode de détermination automatique du niveau de fermeture a été mise en place, permettant une détection précise pour des longueurs de fissure minimales de 0,1mm. L'influence prépondérante de la longueur de la fissure sur la fermeture a ensuite été identifiée. Des calculs tridimensionnels par éléments finis ont ensuite été réalisés sur le code ABAQUS, avec prise en compte du sillage plastique et de la fermeture par plasticité. Les essais numériques ont permis de retrouver, en les expliquant, les différents résultats expérimentaux précédemment obtenus.

SUAREZ FERNANDEZ Maribel, Université Lille I

Directeurs de thèse : J. Lesage, M.H. Staia, M. Traisnel

Date soutenance : 14 décembre 2009

Titre : Etude de la corrosion et du frottement de revêtements obtenus par projection thermique

Résumé : Ce travail concerne l'étude de la corrosion et du frottement de trois revêtements (CrNi-9,5%C, WC-12%Co et WC-10%Ni) déposés par projection thermique sur l'acier SAE 1010. La corrosion est étudiée par les courbes de polarisation obtenues sur les matériaux plongés dans une solution à 3.5% de NaCl. Le frottement par glissement sec ou lubrifié (solution à 3,5% de NaCl) est étudié avec un système bille sur disque. Pour le revêtement CrNi-9,5%C et lorsque la température de traitement augmente, les phases NiCr et Cr_3C_2 diminuent et la phase Cr_7C_3 augmente conduisant à une diminution de la dureté. Nous avons montré également qu'aux températures de 800° et 900°C, la diffusion du Ni vers le substrat améliorerait l'adhérence du revêtement en s'accompagnant toutefois d'une diminution de la dureté dans l'épaisseur du revêtement. La diffusion du nickel participe aussi à l'amélioration de la tenue à la corrosion, principalement galvanique. Concernant le comportement au frottement, le traitement à 900°C montre la meilleure résistance, que ce soit par frottement sec ou lubrifié. Pour les revêtements à base de WC, celui contenant du nickel présente la meilleure tenue à la corrosion, également galvanique. Ce résultat est obtenu par un traitement à 850°C. Dans le cas du revêtement WC-12%Co, la matrice de cobalt se dissout préférentiellement, laissant ainsi les carbures libres. Dans le cas du revêtement WC-10%Ni, la matrice de nickel forme une couche d'oxyde autour des carbures. En frottement, nous avons montré que le revêtement WC-12%Co avait la meilleure résistance, toujours obtenue après un traitement à 850°C, le mécanisme principal d'usure par frottement étant l'abrasion.

GONZALEZ H. Wilfrido A., Université Lille I

Directeurs de thèse : D. Chicot, E.S. Puchi-Cabrera

Date soutenance : 14 décembre 2009

Titre : Etude du comportement en fatigue de l'acier SAE 1045 revêtu par projection thermique HVOF de l'alliage WC-10%Co-4%Cr

Résumé : Ce travail concerne l'étude du comportement en fatigue par flexion rotation du revêtement WC-10%Co-4%Cr, obtenu par projection thermique HVOF, déposé sur l'acier SAE 1045. Les contraintes alternées de fatigue sont comprises entre 358 et 420 MPa. Ce travail a montré que la microstructure du revêtement a une forte influence sur les propriétés mécaniques. Ceci est dû en partie au fait que les particules projetées sont déposées dans un état solide-liquide. Nous montrons aussi que l'accrochage du revêtement sur son substrat n'est pas uniquement de nature mécanique

mais aussi de nature métallurgique. Ainsi, la bonne adhérence est obtenue indépendamment de la rugosité du substrat. L'adhérence est représentée par un terme de « dureté apparente » mesuré à l'interface substrat-revêtement, ce paramètre est utilisé pour comparer les trois différentes conditions de préparation de surface étudiées. La technique par ultrasons est utilisée pour la détermination du module d'élasticité des matériaux impliqués dans le système revêtu. Les valeurs obtenues pour le dépôt HVOF sont tout à fait comparables à celles obtenues par indentation instrumentée sur ce type de matériau. Nous avons également montré que la présence du revêtement conduisait à une diminution des propriétés de fatigue du substrat. Ce point a été confirmé même après correction du diamètre des échantillons de fatigue dû à l'effet de l'épaisseur du revêtement. Enfin, l'analyse par éléments finis à l'aide du code ANSYS a permis la modélisation numérique du comportement en fatigue du système revêtu en prenant en compte la géométrie de l'éprouvette, le moment fléchissant appliqué et les propriétés élastiques des matériaux étudiés.

LASRI Larbi, ENSAM Châlons

Directeurs de thèse : EL Mansori, Nouari

Date soutenance : 15 décembre 2009

Titre : Modélisation Macromécanique et Micromécanique de l'Usinage des Composites à Matrice Polymère et Fibres Longues (FRP)

Résumé : L'usinage des matériaux composites à matrice polymère et fibres longues induit souvent dans la pièce des endommagements subsurfaciques comme la fissuration de la matrice, la rupture de la fibre, et/ou le délaminage intralaminare. Dans ce travail de thèse, deux approches numériques ont été développées pour analyser les aspects micromécaniques et macromécaniques du processus d'usinage. Dans l'approche micromécanique, le matériau est supposé contenir deux phases, la fibre et la matrice, en liaison parfaite. Les résultats montrent que les caractéristiques propres de chacun de ces constituants jouent un rôle déterminant dans la reproduction de la formation du copeau, des efforts de coupe et de l'endommagement induit par l'usinage. Dans l'approche macromécanique, le matériau est considéré comme homogène équivalent. Deux schémas numériques ont été choisis pour intégrer le concept de chute de rigidité dans la loi de comportement du matériau usiné. Un premier schéma implicite a été réalisé avec le code ABAQUS Standard via la subroutine USDFLD pour suivre l'initiation et la progression du processus d'endommagement dans la structure composite. Un second schéma explicite a été adopté et implémenté via une subroutine VUMAT pour analyser l'effet des conditions de coupe sur le procédé d'usinage. Les résultats en termes d'efforts de coupe, de mécanismes physiques régissant la formation du copeau, et d'évolution de l'endommagement montrent une bonne concordance avec les essais expérimentaux. Il a été montré dans cette étude que l'orientation des fibres et l'acuité de l'arête de coupe sont les principaux paramètres influençant l'usinage des matériaux composites à matrice polymère et fibres longues.

PESSARD Etienne, ENSAM Angers

Directeurs de thèse : F. Morel, A. Morel

Date soutenance : 16 décembre 2009

Titre : Comportement anisotrope en fatigue des composants mécaniques forgés

Résumé : Cette étude qui s'inscrit dans le cadre d'un projet ANR OPTIFORGE traitant du comportement en fatigue des pièces forgées a pour objectif, d'une part, de comprendre les effets des hétérogénéités microstructurales issues de la phase de mise en oeuvre sur les mécanismes d'endommagement en fatigue, et d'autre part, de proposer un critère d'endurance anisotrope adapté à la spécificité des composants mécaniques forgés. Dans une première partie, l'analyse des effets des procédés de déformation plastique (forgeage et laminage) sur la tenue en fatigue des composants métalliques obtenus est abordée. A partir de différentes campagnes d'essai, le comportement anisotrope en Fatigue à Grand Nombre de Cycles (FGNC) de différents aciers est caractérisé. Une attention particulière est portée à la description et à l'analyse des mécanismes d'endommagement en FGNC. Les effets de la microstructure et du contenu inclusionnaire sur les mécanismes d'endommagement sont particulièrement analysés. Des essais d'auto-échauffement

sont également menés afin de tester l'utilisation de ces méthodes de caractérisation des propriétés en fatigue dites rapides dans le cas d'acier dont le comportement en fatigue est anisotrope. Un critère de fatigue probabiliste anisotrope est ensuite proposé. Basé sur l'hypothèse du maillon le plus faible, il permet d'exprimer de façon simple la compétition possible entre différents types de mécanismes. Le critère obtenu est adapté pour les matériaux contenant ou non des défauts et les prévisions peuvent être entre autres illustrées par le tracé d'un diagramme de Kitagawa probabiliste. Grâce à ce nouveau critère, des paramètres microstructuraux issus de l'opération de mise en forme peuvent être intégrés dans le calcul de dimensionnement en fatigue. Une optimisation de la préforme du composant ou des paramètres de mise en forme peut dès lors être envisagée.

WICKER Paul, Centrale Lille

Directeurs de thèse : G. Degallaix, P. Dufresnoy

Date soutenance : 17 décembre 2009

Titre : Influence des garnitures de frein sur les sollicitations thermiques des disques TGV et conséquences sur les risques de fissuration

Résumé : L'occurrence en service commercial de fissures macroscopiques dans certains disques de frein TGV a pu être reliée au type de garniture utilisé. L'objectif de cette thèse est de comprendre cette relation, d'identifier les paramètres d'influence et de proposer des voies d'amélioration pour la conception de garnitures à risque de fissuration réduit. Le comportement thermique de quatre couples disque-garnitures a d'abord été analysé par le biais d'une campagne expérimentale de freinage originale. Elle a mis en évidence différents types de localisations thermiques et a permis d'identifier des signatures thermiques caractéristiques des garnitures. Le lien entre localisations thermiques et risques de fissuration a ensuite été établi à l'aide d'une modélisation thermomécanique. Des indicateurs tenant compte des caractéristiques spatiales et temporelles des localisations thermiques ainsi que des niveaux de température atteints ont été proposés. Ils ont permis de classer les garnitures testées dans un graphe de « criticité ». Enfin, une étude d'influence des caractéristiques mécaniques et thermiques des garnitures sur les localisations engendrées a permis de dégager des préconisations et des voies d'amélioration pour la conception de nouvelles garnitures. La caractérisation expérimentale du comportement de deux nouvelles garnitures, l'une s'approchant le plus des préconisations faites, l'autre s'en éloignant fortement, a montré la pertinence de l'approche développée et la validité des préconisations.

VATTRE Aurélien, Mines Paris / ONERA

Directeurs de thèse : B. Devincré, A. Roos

Date soutenance : 17 décembre 2009

Titre : Durcissement des superalliages monocristallins: des mécanismes physiques à la modélisation continue

Résumé : Ce présent travail s'inscrit dans le cadre de la modélisation multi-échelles de la plasticité cristalline des superalliages monocristallins à base nickel. Dans ce contexte, une transition d'informations recueillies à l'échelle mésoscopique justifiant physiquement un modèle micromécanique est mise en évidence. Un couplage entre une simulation par dynamique des dislocations et la méthode des éléments finis, le Modèle Discret-Continu (MDC) est utilisé afin de reproduire les interactions entre dislocations et précipités. Une première application a pour objet de décrire des effets d'échelle induits par une variation de la largeur du couloir de matrice sur les propriétés mécaniques. La relation entre les microstructures simulées de dislocations, la contrainte d'écoulement et la déformation plastique est appréhendée. Une seconde étude traite de l'influence de l'orientation du chargement sur le comportement mécanique du superalliage. Les interactions entre les systèmes primaires et déviés sont discutées et leur rôle majeur dans la localisation de la déformation plastique dans les couloirs de matrice est démontré. Par ailleurs, l'écrantage des interactions élastiques à longues portées associées aux réseaux de dislocations d'interface explique l'origine du faible taux d'écrouissage observé pour des essais orientés $\langle 111 \rangle$ à hautes températures. Fortes des interprétations faites à l'échelle des dislocations, deux modélisations de nature très

différentes sont développées. Une première évoque dans sa formulation une loi de durcissement dictée par une densité de dislocations géométriquement nécessaires. La formation et l'évolution des microstructures de dislocations est étudiée: la comparaison avec les résultats obtenus avec le MDC montre les faiblesses de cette approche continue. On justifie ainsi le développement d'un second modèle micromécanique par homogénéisation, pour lequel la réponse globale du matériau est déterminée en considérant les rôles de la microstructure et des interactions mécaniques entre constituants. Dans ce modèle, les mécanismes locaux sont décrits de manière physique et les lois d'écroutissage sont écrites en termes de densités de dislocations mobiles. Il a été identifié à 850 et 950°C, et validé avec succès sur le superalliage CMSX-4 monocristallin.

GIBEAU Elie, Université Besançon

Directeurs de thèse : C. LExcellent, L. Boubakar, R.M. Laydi

Date soutenance : 17 décembre 2009

Titre : Comparaison entre diverses approches de la modélisation du comportement thermomécanique des alliages à mémoire de forme

Résumé : Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont depuis longtemps une thématique de recherche explorée au sein du département de mécanique appliquée de Besançon (près de 20 thèses soutenues jusqu'à présent). Mes travaux de thèse se sont portés sur l'aspect modélisation thermomécanique des AMF. A cette fin une étude bibliographique des derniers modèles a été construite dans un premier temps. Deux de ces modèles thermodynamiques du comportement des AMF ont été choisis pour une étude plus fine (Modèle de LExcellent et al. et modèle de Sadjadpour et Bhattacharya). Les potentialités de ces modèles ont été testées dans le cadre d'un « roundrobin » européen. En effet, des essais de traction, traction-torsion isothermes et anisothermes sur des fils de NiTi ont été réalisés par l'équipe des Matériaux Fonctionnels du Professeur Sittner de Prague. Sept groupes (1 tchèque, 1 italien, 1 américain et 4 français) ont modélisé ces expériences. Une attention particulière a été portée à l'identification des différents paramètres des modèles et la mise en oeuvre des différents modèles. L'originalité du premier modèle que nous avons choisi tient en deux points, la prise en compte de la dissymétrie entre la traction et la compression et le choix de constantes élastiques différentes pour la phase mère austénitique et la phase produite martensitique. Le second modèle est basé sur l'étude de la surface de fin de transformation des AMF. Cette dernière fait introduire la notion de déformation de transformation associée à la martensite, laquelle sera au centre du modèle. Un dernier volet a consisté en l'étude théorique de la convexité et du transport des surfaces de transformation de phase pour des essais multiaxiaux proportionnels. Pour ce faire, les compétences mathématiques de Rachid Mohamed Laydi (Maître de conférence à ENS2M Besançon) ont été précieuses. Cette étude permet de créer un lien entre les deux modèles choisis auparavant.

BYTEBIER Karl, Université Montpellier 2

Directeur de thèse : J. Gril

Date soutenance : 18 décembre 2009

Titre : Etude du comportement mécanique de la paroi cellulaire du bois par Microscopie à Force Atomique

Résumé : Le bois en tant que matériau présente des propriétés effectives exceptionnelles mais son origine biologique entraîne un manque de stabilité physico-mécanique et biochimique ainsi qu'une grande variabilité d'organisation de ses éléments constitutifs à plusieurs échelles (cerne annuel, tissus ligneux, cellule, paroi cellulaire, matière ligno-cellulosique, macromolécules) qui limitent son utilisation. Nous avons, dans le cadre de cette thèse, utilisé la microscopie à force atomique en tant qu'outil de caractérisation des propriétés mécaniques. Le but était de quantifier les propriétés viscoélastiques de couche de la paroi cellulaire de bois. Les travaux ont porté sur la mise au point de protocoles expérimentaux visant à l'amélioration de la qualité des échantillons de bois, à la calibration de la raideur et du rayon de pointe des microleviers utilisés en AFM et de sa réponse lors de l'utilisation d'un mode AFM particulier: le mode contact résonnant. Les résultats obtenus se

situent dans la même gamme que les valeurs issues de la littérature, et laissent entrevoir des développements futurs pouvant apporter des réponses qu'il ne semble pas possible d'atteindre avec les autres méthodes disponibles à l'heure actuelle.

AMMAR Kais, Mines Paris

Directeurs de thèse : G. Cailletaud, S. Forest, B. Appolaire

Date soutenance : 20 janvier 2010

Titre : Modélisation et simulation du couplage changement de phases-mécanique par la méthode des champs de phases

Résumé : Nous proposons un cadre générique, permettant l'incorporation des différentes lois de comportement de mécanique linéaires ou non-linéaires (i.e. élastoviscoplastique) dans les approches des champs de phases utilisées pour la modélisation et la simulation de la mobilité d'interfaces diffuses. Dans ce cadre, une formulation par éléments finis des modèles couplés champ de phases-élastoplasticité pour les alliages binaires est développée dans le formalisme général de la thermodynamique des milieux continus. Cette formulation est basée sur la théorie d'équilibre des microforces, proposée par Gurtin, où une équation supplémentaire, fonction du paramètre d'ordre et de son gradient, est introduite. La formulation est employée pour simuler les évolutions morphologiques complexes des microstructures hétérogènes et décrire l'interface diffuse entre deux phases en présence des contraintes induites par transformation de phase. En utilisant les principes de la thermodynamique des processus irréversibles, les lois de comportement et les équations d'évolution sont clairement exposées et séparées dans la formulation de sorte que des modèles non-linéaires et fortement couplés puissent être implantés plus facilement dans un code par éléments finis. Cette formulation peut être appliquée aux corps finis périodiques et non périodiques, aux microstructures hétérogènes. Les conditions initiales et les conditions aux limites en paramètre d'ordre et en concentration ainsi que leurs quantités duales sont clairement énoncées. Des techniques d'homogénéisation ont été utilisées pour décrire le comportement dans les interfaces diffuses. Les conséquences de ces choix de modélisation ont été déterminées en ce qui concerne les effets des contraintes mécaniques sur les équilibres de phases et la cinétique de transformation. L'ensemble des équations d'évolution couplées, à savoir l'équation d'équilibre statique local, l'équation de champ de phases et l'équation de conservation de la masse, est résolu en utilisant la méthode des éléments finis pour la discrétisation spatiale et un schéma implicite des différences finies pour la discrétisation temporelle. Afin d'illustrer l'intérêt de l'approche proposée, des calculs par éléments finis ont été effectués sur des situations élémentaires telles que le calcul des concentrations d'équilibre des phases en présence de contraintes et la croissance de précipités dans une matrice élastique ou élasto- plastique, situations pour lesquelles des solutions analytiques pour des interfaces parfaites sont disponibles.

MZABI Samy, ESPCI

Date soutenance : 27 janvier 2010

Titre : Caractérisation et analyse des mécanismes de fracture en fatigue des élastomères chargés

Résumé : Cette thèse porte sur les mécanismes de fracture en fatigue des élastomères chargés. Elle tente de relier les informations obtenues à l'échelle macroscopique (la vitesse de propagation de fissure en fatigue dc/dN , le taux de restitution d'énergie G) à la microstructure de ces matériaux. Suivant une démarche expérimentale multi-échelles, nous avons proposé et développé plusieurs techniques d'observation et de mesure locales sur différents mélanges SBR modèles. Ces derniers comprennent une microstructure différente en terme de densité pontale et de fraction volumique de charge. L'analyse en fatigue en régime stationnaire ($500 < G < 5000 \text{ J/m}^2$) a révélé, à iso- G , des différences de vitesse de propagation par cycle, dc/dN , importantes, liées au taux de charge et plus spécialement au degré de réticulation. Plusieurs observations ont été faites tels que la mesure du rayon de fond de fissure, l'effet 3D en pointe de fissure et l'auto-échauffement du matériau. Elles indiquent la présence d'une zone plus déformée près de la fissure que le reste du matériau, appelée « zone d'influence », dont les dimensions restent imprécises. L'étude des champs de déplacement

locaux, par Corrélation d'Images, a mis en évidence l'existence, en plus de la zone d'influence, d'une zone très déformée, orientée, localisée très près de la pointe de fissure. L'estimation de la déformation maximale en pointe de fissure, ϵ_{max} , a montré que la loi de comportement locale du matériau était de première importance en fatigue et qu'il était possible de proposer un critère de propagation de fissure au moyen d'un taux de restitution d'énergie local, g_{local} . La problématique macro \leftrightarrow micro a donc pu être ramenée à une problématique méso-micro. Pour raccorder ces échelles, nous avons proposé, suite à des observations microscopiques, un critère de rupture basé sur la rupture progressive de chaînes atteignant une extension proche de leur extensibilité limite.